

บทที่ 3

ผลการทดลอง และวิจารณ์ผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ทำการศึกษากระบวนการแกสฟิเคชันของชีวมวลในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง โดยชนิดของชีวมวลที่นำมาศึกษาคือ ยูคาลิปตัส และขี้เลื่อยไม้สัก ซึ่งมีความเหมาะสมในการนำมาใช้เป็นแหล่งพลังงานทดแทนในการทดลองได้ศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อกระบวนการแกสฟิเคชันของชีวมวล ได้แก่ อุณหภูมิในช่วง 500-650 องศาเซลเซียส อัตราส่วนของชีวมวลต่อตัวเร่งปฏิกิริยา อัตราการป้อนไอน้ำ รวมถึงชีวมวลผสมของยูคาลิปตัสกับขี้เลื่อย การนำตัวเร่งปฏิกิริยากลับมาใช้ซ้ำ และเปรียบเทียบผลการศึกษาของผลิตภัณฑ์แก๊สที่ได้จากยูคาลิปตัส และขี้เลื่อย

3.1 การวิเคราะห์แบบประมาณ การวิเคราะห์แบบแยกธาตุ และค่าความร้อนของยูคาลิปตัส และขี้เลื่อย

ผลการวิเคราะห์แบบประมาณ การวิเคราะห์แบบแยกธาตุ และค่าความร้อนของ ยูคาลิปตัส และขี้เลื่อย แสดงในตาราง 3.1

ตาราง 3.1 ผลการวิเคราะห์แบบประมาณ การวิเคราะห์แบบแยกธาตุ และค่าความร้อนของยูคาลิปตัสของยูคาลิปตัส และขี้เลื่อย

การวิเคราะห์แบบประมาณ	ยูคาลิปตัส (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	ขี้เลื่อย (ร้อยละโดยน้ำหนัก)
ความชื้น	5.21	7.56
สารระเหยได้	78.66	73.88
เถ้า	3.53	0.48
คาร์บอนคงตัว	12.60	18.07
การวิเคราะห์แบบแยกธาตุ	ยูคาลิปตัส (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	ขี้เลื่อย (ร้อยละโดยน้ำหนัก)
คาร์บอน	48.28	45.87
ไฮโดรเจน	6.65	6.73
ไนโตรเจน	0.22	0.44
ออกซิเจน (ผลต่าง)	44.85	46.97

ตาราง 3.1 (ต่อ) ผลการวิเคราะห์แบบประมาณ การวิเคราะห์แบบแยกธาตุ และค่าความร้อนของยูคาลิปตัสของยูคาลิปตัส และจี้เลื่อย

ร้อยละของซัลเฟอร์ และค่าความร้อน	ยูคาลิปตัส (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	จี้เลื่อย (ร้อยละโดยน้ำหนัก)
ซัลเฟอร์	0.08	0.01
ค่าความร้อนสูง (แคลอรีต่อกรัม)	4,221	4,080

หมายเหตุ: ฐานการวิเคราะห์เป็นแบบ *as received*

จากผลการวิเคราะห์แบบประมาณของยูคาลิปตัส และจี้เลื่อย พบว่ามีปริมาณสารระเหยได้ค่อนข้างสูง คือ ร้อยละ 78.66 และ 73.88 มีปริมาณเถ้าค่อนข้างต่ำ คือร้อยละ 3.53 และ 0.48 ส่วนผลการวิเคราะห์แบบแยกธาตุของยูคาลิปตัส และจี้เลื่อยพบว่ามีธาตุคาร์บอนร้อยละ 48.28 และ 45.87 ไฮโดรเจนร้อยละ 6.65 และ 6.73 ออกซิเจนร้อยละ 44.85 และ 46.97 ส่วนค่าความร้อนสูงของยูคาลิปตัส และจี้เลื่อยมีค่า 4,221 และ 4,080 แคลอรีต่อกรัม จากข้อมูลเบื้องต้น พบว่าการที่ยูคาลิปตัส และจี้เลื่อยมีค่าความร้อนค่อนข้างสูงนั้น สอดคล้องกับปริมาณสารระเหยได้ เนื่องจากในเนื้อไม้ องค์ประกอบของสารอินทรีย์ ซึ่งเป็นส่วนที่สามารถเผาไหม้ได้ อีกทั้งในยูคาลิปตัส และจี้เลื่อยมีปริมาณเถ้าต่ำซึ่งในเถ้าจะมีองค์ประกอบเป็นสารอินทรีย์ ที่ไม่สามารถเผาไหม้ได้ จึงส่งผลให้ค่าความร้อนของยูคาลิปตัส และจี้เลื่อยนั้นมีค่าค่อนข้างสูง

3.2 การวิเคราะห์แบบประมาณ แบบแยกธาตุ และค่าความร้อนของถ่านหินลิกไนต์ และการวิเคราะห์ปริมาณโลหะของถ่านหินลิกไนต์ และตัวเร่งปฏิกิริยา

ผลการวิเคราะห์แบบประมาณ การวิเคราะห์แบบแยกธาตุ และค่าความร้อนของถ่านหินลิกไนต์ที่ใช้เป็นตัวรองรับ (Supporter) ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลบนถ่านหินลิกไนต์ แสดงดังตาราง 3.2

ตาราง 3.2 ผลการวิเคราะห์แบบประมาณ การวิเคราะห์แบบแยกธาตุ และค่าความร้อนของถ่านหินลิกไนต์

การวิเคราะห์แบบประมาณ	ถ่านหินลิกไนต์ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)
ความชื้น	10.82
สารระเหยได้	46.92
เถ้า	22.40
คาร์บอนคงตัว	19.86

ตาราง 3.2 (ต่อ) ผลการวิเคราะห์แบบประมาณ การวิเคราะห์แบบแยกธาตุ และค่าความร้อนของ ถ่านหินลิกไนต์

การวิเคราะห์แบบแยกธาตุ	ถ่านหินลิกไนต์ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)
คาร์บอน	49.61
ไฮโดรเจน	2.55
ไนโตรเจน	1.50
ออกซิเจน (ผลต่าง)	46.34
ร้อยละของซัลเฟอร์ และค่าความร้อน	ถ่านหินลิกไนต์ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)
ซัลเฟอร์	0.54
ค่าความร้อนสูง (แคลอรีต่อกรัม)	4,207

หมายเหตุ: ฐานการวิเคราะห์เป็นแบบ *as received*

จากการวิเคราะห์ปริมาณกลุ่มสารของถ่านหินลิกไนต์ พบว่ามีปริมาณเถ้าค่อนข้างสูง ซึ่งเนื่องจากแหล่งกำเนิดของถ่านหินเอง เนื่องจากในเถ้าประกอบด้วยสารอนินทรีย์ แร่ธาตุ รวมไปถึงสารประกอบของโลหะต่างๆ ซึ่งไม่สามารถเผาไหม้ได้ จึงทำให้ค่าความร้อนของถ่านหินลิกไนต์มีค่าค่อนข้างต่ำ เมื่อเทียบกับถ่านหินศักดิ์ (Rank) อื่นๆ

ซึ่งจากผลการวิเคราะห์ปริมาณโลหะต่างๆ ในเถ้าของถ่านหินตามมาตรฐาน ASTM D 3683-78 แสดงดังตาราง 3.3 โดยทำการวิเคราะห์เถ้าของถ่านหิน และเถ้าของตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลบนถ่านหินลิกไนต์ พบว่า ในเถ้าของถ่านหินลิกไนต์มีปริมาณอะลูมิเนียม และเหล็กสูงค่อนข้างสูง ส่วนโลหะอื่นๆ มีปริมาณน้อยมาก ส่วนเถ้าของตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลบนถ่านหินลิกไนต์ พบว่า โลหะที่มีปริมาณน้อย เช่น Cd, Co, Cr และ Cu เป็นต้น มีค่าไม่แตกต่างกันมากเมื่อเทียบกับปริมาณโลหะในเถ้าของถ่านหินลิกไนต์ สำหรับ Al และ Fe นั้น พบว่าปริมาณลดลงประมาณร้อยละ 50 และ 62 ตามลำดับ ซึ่งอาจเกิดจากขั้นตอนการชะ ในการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา ส่วน Ni มีปริมาณเพิ่มขึ้นเนื่องจากในขั้นตอนการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาได้มีการเติม นิกเกิลคาร์บอนเนตเบสิกไฮดรต ($\text{NiCO}_3 \cdot 2\text{Ni(OH)}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$) ลงไป จึงทำให้มีปริมาณนิกเกิลในเถ้าของตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลบนถ่านหินลิกไนต์สูง ซึ่งจากการวิเคราะห์ปริมาณนิกเกิลในตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลบนถ่านหินลิกไนต์ด้วยวิธีเถ้าพบว่า มีปริมาณนิกเกิล ร้อยละ 24.59 ซึ่งใกล้เคียงกับวิธีอะตอมิก แอ็บซอร์ปชัน สเปกโตรโฟโตเมทรี (AAS) ที่วิเคราะห์ปริมาณนิกเกิลได้ ร้อยละ 26.97

ตาราง 3.3 ผลการวิเคราะห์โลหะในถ่านหินลิกไนต์ และตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลบนถ่านหินลิกไนต์ โดยเทคนิคอะตอมมิก แอ็บซอร์ปชัน สเปกโตรโฟโตเมทรี (AAS)

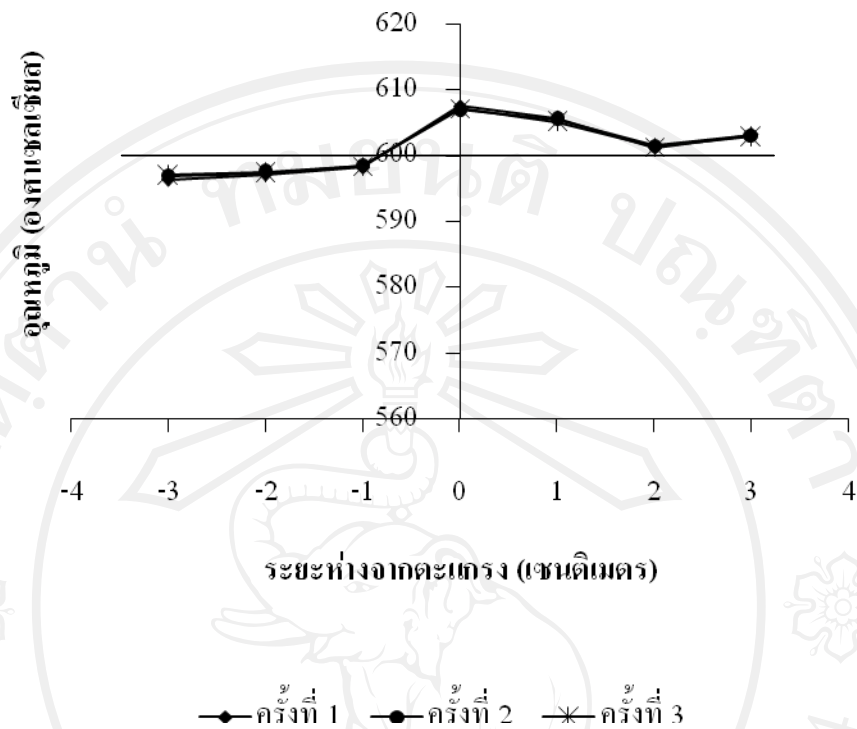
ธาตุ	ถ่านหินลิกไนต์ (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลบนถ่านหินลิกไนต์ (มิลลิกรัมต่อลิตร)
Al	111.9	55.69
Cd	0.01	0.001
Co	0.047	0.07
Cr	0.307	0.263
Cu	0.382	0.38
Fe	98.19	37.15
Mn	0.753	0.065
Ni	2.56	593.5
Pb	0.125	0.097
Zn	0.217	0.14

3.3 ผลการทดสอบอุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์

3.3.1 ผลการหา Heating zone ในท่อปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งของเครื่องปฏิกรณ์ตัวเร่งปฏิกิริยา โดยทำการทดลองที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส



รูป 3.1 ท่อปฏิกรณ์ตัวเร่งปฏิกิริยา



รูป 3.2 อุณหภูมิในท่อปฏิกรณ์กับระยะห่างจากตะแกรงในท่อปฏิกรณ์

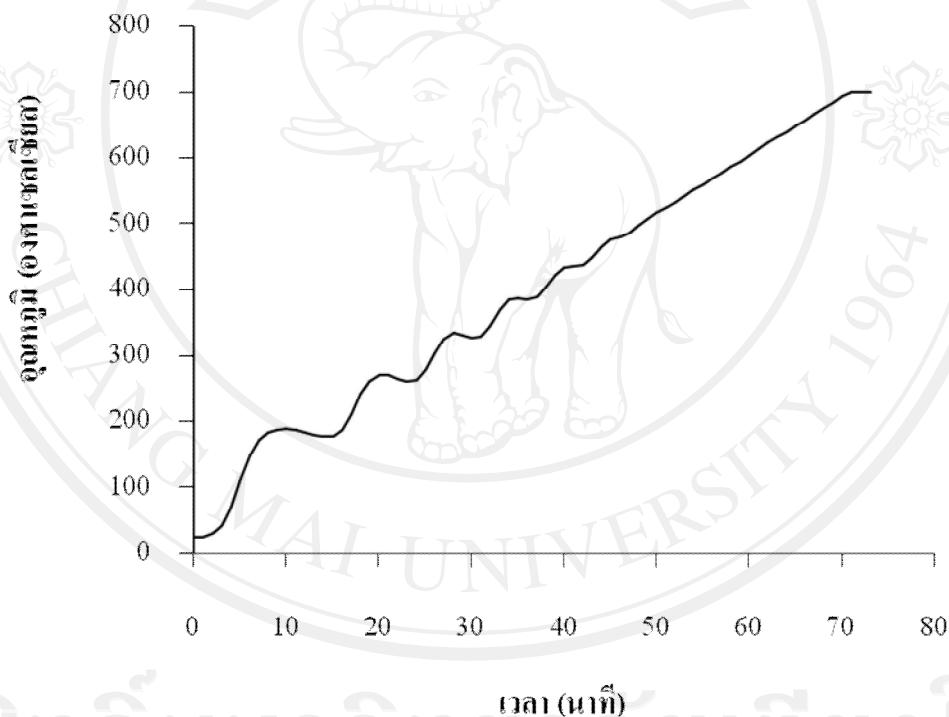
ตาราง 3.4 ค่าอุณหภูมิในส่วน Heating zone ในท่อปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง ของเครื่องปฏิกรณ์ตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalytic reactor)

ระยะห่างจากตะแกรง (เซนติเมตร)	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย
3	603.1	603.0	602.8	602.9
2	601.2	601.5	601.3	601.3
1	605.7	605.5	605.1	605.4
0	607.5	606.9	607.1	607.1
-1	598.2	598.5	598.4	598.3
-2	597.1	597.5	597.3	597.3
-3	596.3	597.0	596.9	596.7

จากรูป 3.2 และตารางที่ 3.4 พบว่าระยะห่างจากตะแกรงในท่อปฏิกิริยาที่มีอุณหภูมิใกล้เคียง 600 องศาเซลเซียสมากที่สุด คือ เหนือตะแกรงระยะ 2 เซนติเมตร ซึ่งอุณหภูมิที่ทำการทดลองค่อนข้างคงที่ จึงใช้ความสูงของเบ็ดตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีความสูงเท่ากับ 2 เซนติเมตรในการทดลองแต่ละครั้ง

3.3.2 ผลการทดสอบอุณหภูมิของเครื่องไล่สารระเหย (Devolatilizer)

ผลการทดสอบอุณหภูมิของเครื่องไล่สารระเหยที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส โดยมีอัตราการให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียสต่อนาที แสดงดังรูป 3.4

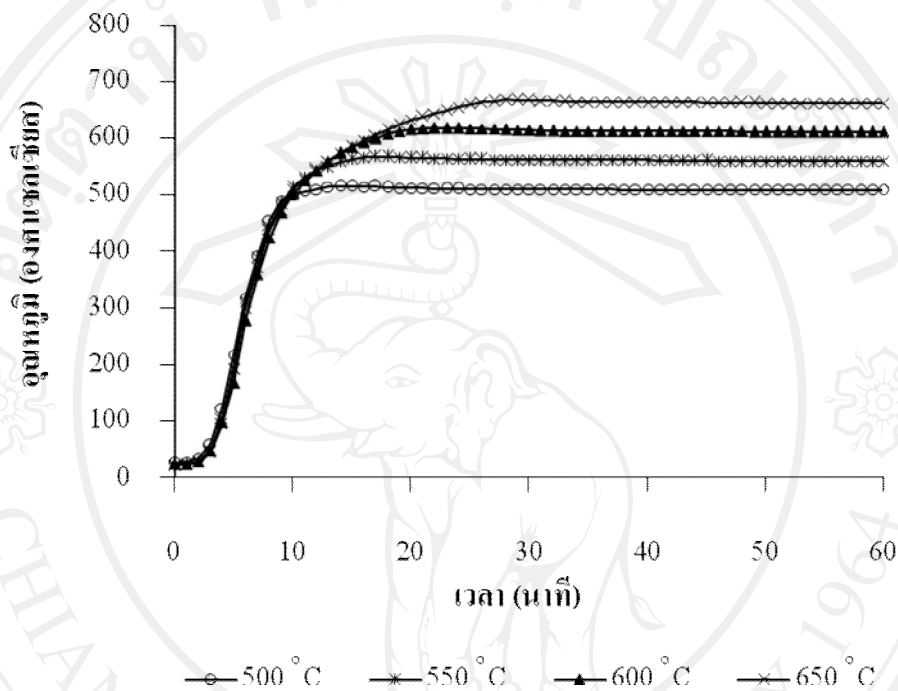


รูป 3.3 ผลการทดสอบอุณหภูมิของเครื่องไล่สารระเหยที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส

จากผลการทดสอบอุณหภูมิของเครื่องไล่สารระเหย (Devolatilizer) ซึ่งแสดงดังรูป 3.3 โดยทำการวัดอุณหภูมิเทียบกับเทอร์โมคัปเปิลชนิด K (Thermocouple type K) เริ่มวัดจากอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมจนถึง 700 องศาเซลเซียส มีอัตราการให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียสต่อนาที ในการทดสอบใช้เวลาประมาณ 70 นาทีจึงถึงอุณหภูมิที่ตั้งค่าไว้

3.3.3 ผลการทดสอบอุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์ตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalytic reactor) ที่ช่วงอุณหภูมิต่างๆ

ผลการทดสอบอุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์ตัวเร่งปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 500, 550, 600 และ 650 องศาเซลเซียส แสดงดังรูป 3.4



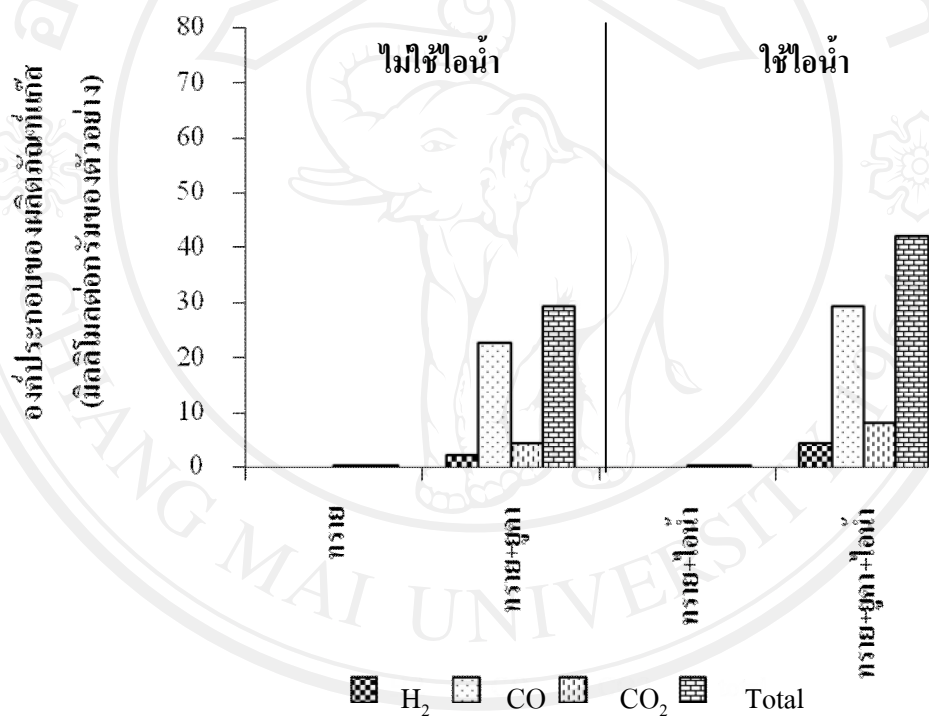
รูป 3.4 ผลการทดสอบอุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์ตัวเร่งปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 500 – 650 องศาเซลเซียส

จากรูป 3.4 พบว่าผลการทดสอบอุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์ตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalytic reactor) โดยมีอัตราการให้ความร้อนแบบปล่อยอิสระ จะใช้เวลาในการขึ้นไปถึงอุณหภูมิที่ตั้งค่าไว้แตกต่างกัน คือ ที่อุณหภูมิ 500, 550, 600 และ 650 องศาเซลเซียส ใช้เวลาประมาณ 10, 13, 17 และ 23 นาทีตามลำดับ และโดยใช้เทอร์โมคัปเปิลชนิด K (Type K) ในการทดสอบอุณหภูมิจากผลการทดลอง พบว่าอุณหภูมิมียาค่าค่อนข้างคงที่ ซึ่งอุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์ตัวเร่งปฏิกิริยามีผลต่อการเกิดปฏิกิริยาต่างๆของกระบวนการ แกสซิฟิเคชัน เช่น ปฏิกิริยาออกซิเดชันบางส่วน (Partial-oxidation) ปฏิกิริยา Water gas และปฏิกิริยา Water gas shift เป็นต้น เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ จึงส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาของกระบวนการ แกสซิฟิเคชัน ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์แก๊สต่างกันไปด้วย ดังนั้นในการทดลองแต่ละครั้งจำเป็นต้องมีการควบคุมอุณหภูมิให้คงที่มากที่สุด เพื่อให้ได้ประสิทธิภาพและความแม่นยำในการทดลองมากที่สุด

3.4 ผลการศึกษาการผลิตแก๊สไฮโดรเจนจากยูคาลิปตัสโดยแกสซิฟเคชันด้วยไอน้ำแบบมีตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลบนถ่านหินลิกไนต์

3.4.1 ผลการทดลองการแกสซิฟเคชันของยูคาลิปตัสโดยการใช้และไม่ใช้ไอน้ำแบบไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลบนถ่านหินลิกไนต์

ศึกษาการแกสซิฟเคชันของยูคาลิปตัส โดยใช้ไอน้ำ 30 กิโลปาสกาล และไม่ใช้ไอน้ำ ทำการทดลองที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส ใช้ยูคาลิปตัสประมาณ 1 กรัม โดยไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลบนถ่านหินลิกไนต์ ผลการทดลองแสดงดังรูป 3.5



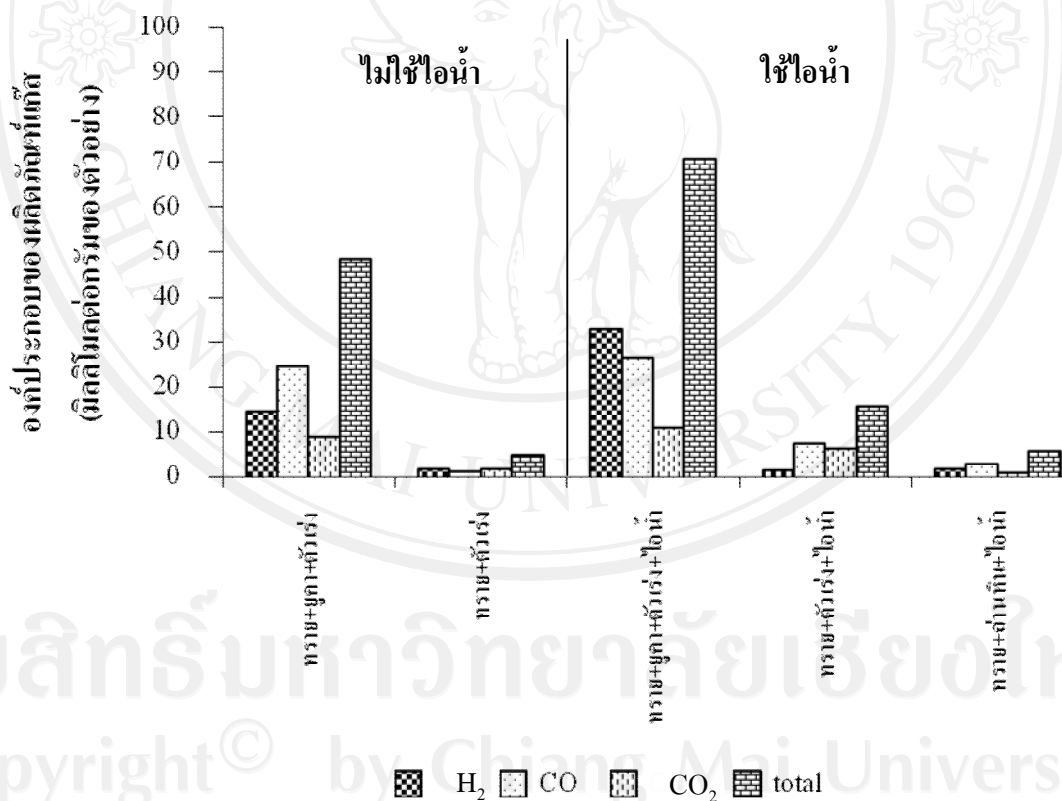
รูป 3.5 ผลการทดลองการแกสซิฟเคชันของยูคาลิปตัสโดยการใช้และไม่ใช้ไอน้ำแบบไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลบนถ่านหินลิกไนต์

จากผลการทดลองในรูป 3.5 พบว่า เมื่อมีการป้อนไอน้ำที่ 30 กิโลปาสกาลเข้าไปในกระบวนการแกสซิฟเคชันของยูคาลิปตัส พบว่า มีผลทำให้องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊สรวม มีปริมาณเพิ่มขึ้นมากกว่าการที่ไม่ใช้ไอน้ำ โดยเพิ่มขึ้นจาก 29.57 เป็น 42.26 มิลลิโมลต่อกรัมของตัวอย่าง ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Chaudhari และคณะ^[44] กับ Franco และคณะ^[15] ทั้งนี้เพราะโดยทั่วไปแล้วปฏิกิริยาของ Steam gasification เกี่ยวเนื่องกับปฏิกิริยาของออกซิเจน คาร์บอนได-

ออกไซด์ ไฮโดรเจน และน้ำ กับคาร์บอนที่อยู่ในชีวมวล เกิดเป็นแก๊ส อีกทั้งไอน้ำยังเป็นแหล่งสำคัญที่ช่วยในการผลิตไฮโดรเจนในกระบวนการ Steam gasification อีกด้วย

3.4.2 ผลการทดลองการแก๊สฟิเคชันของยูคาลิปตัสโดยใช้ และไม่ใช้ไอน้ำแบบมีตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลบนถ่านหินลิกไนต์ และผลการแก๊สฟิเคชันของตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลบนถ่านหินลิกไนต์

ศึกษาผลการทดลองในการแก๊สฟิเคชันของยูคาลิปตัสแบบมีตัวเร่งปฏิกิริยา โดยใช้ไอน้ำป้อน 30 กิโลปาสกาล และไม่ใช้ไอน้ำ ทำการทดลองที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส โดยมี ร้อยละ 26 โดยน้ำหนักของนิกเกิลบนถ่านหินลิกไนต์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา และผลของตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลบนถ่านหินลิกไนต์โดยไม่มียูคาลิปตัส



รูป 3.6 ผลการทดลองการแก๊สฟิเคชันของยูคาลิปตัสโดยใช้ และไม่ใช้ไอน้ำแบบมีตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลบนถ่านหินลิกไนต์ ผลของตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลบนถ่านหินลิกไนต์โดยไม่มียูคาลิปตัส และผลของถ่านหินลิกไนต์โดยไม่มีนิกเกิล

จากผลการทดลองในรูป 3.6 พบว่าองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊สแต่ละชนิด มีการเปลี่ยนแปลงอย่างเห็นได้ชัด คือ เมื่อใช้ยูคาลิปตัสกับตัวเร่งปฏิกิริยา แต่ไม่ใช่ไอน้ำ เปรียบเทียบกับการใช้ยูคาลิปตัสกับตัวเร่งปฏิกิริยา และไอน้ำ พบว่าไฮโดรเจน คาร์บอนมอนอกไซด์ และ คาร์บอนไดออกไซด์ เพิ่มขึ้นจาก 14.76 เป็น 33.05 จาก 24.61 เป็น 26.70 และ จาก 9.15 เป็น 11.05 มิลลิโมลต่อกรัมของยูคาลิปตัส ตามลำดับ และผลิตภัณฑ์แก๊สรวมเพิ่มขึ้นจาก 48.52 เป็น 70.79 มิลลิโมลต่อกรัมของตัวอย่าง

นอกจากผลกระทบของปฏิกิริยา Steam gasification ดังที่ได้กล่าวไปแล้วในหัวข้อ 3.4.1 และยังเกี่ยวข้องกับปฏิกิริยาของแก๊สแต่ละชนิดบนพื้นผิวของคาร์บอน ซึ่งกล่าวได้ว่าปฏิกิริยาส่วนใหญ่ของแก๊สฟิเคชัน และไพโรไลซิสของชีวมวล หรือถ่านหินเป็นปฏิกิริยาคูดความร้อน ด้วยเหตุนี้พลังงานความร้อนที่ป้อนเข้าสู่เตาปฏิกรณ์จึงมีความสำคัญต่อผลิตภัณฑ์แก๊สแต่ละชนิด ซึ่งปฏิกิริยาที่สำคัญมีดังนี้^[37-40]

Carbon steam gasification:



Catalytic steam gasification of biomass tar:



Steam reforming:



Water-gas shift reaction:



Tar cracking:



Methane reforming:



จะเห็นได้ว่าปฏิกิริยา Carbon gasification ปฏิกิริยา Catalytic steam gasification of biomass tar และปฏิกิริยา Steam reforming โดยมีนิกเกิลบนถ่านหินลิกไนต์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา เปรียบเทียบกับการใช้และไม่ใช้ไอน้ำ พบว่าเมื่อทำการป้อนไอน้ำที่ความดันย่อย 30 กิโลปาสกาล แล้วมีผลทำให้ได้ผลิตภัณฑ์แก๊สรวมเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด คือ จาก 48.52 เป็น 70.79 มิลลิโมลต่อกรัมของตัวอย่าง การที่ผลิตภัณฑ์แก๊สเพิ่มขึ้น โดยเฉพาะไฮโดรเจนนั้น อาจเนื่องมาจาก ปฏิกิริยา Steam reforming และ Water-gas shift ซึ่งพบว่าจากการใช้ยูคาลิปตัสกับตัวเร่งปฏิกิริยาและไอน้ำ ทำให้ไฮโดรเจนเพิ่มขึ้นถึง 15.3 เท่าเมื่อเทียบกับการที่ใช้ยูคาลิปตัสโดยไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยา และไอน้ำ อีกทั้งเมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลบนถ่านหินลิกไนต์ในการแกสซิฟิเคชันของยูคาลิปตัสจะช่วยให้เกิดปฏิกิริยาการแตกตัวของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนได้เป็น $\text{CH}_x\text{-Ni}$ และไฮโดรเจน จากนั้น $\text{CH}_x\text{-Ni}$ จะไปทำปฏิกิริยาต่อกับไอน้ำได้คาร์บอนมอนอกไซด์ และไฮโดรเจนเป็นผลิตภัณฑ์ แสดงได้ดังสมการ 3.5 และ 3.6 นอกจากนี้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลบนถ่านหินลิกไนต์ ยังไปเพิ่มอัตราการเกิดปฏิกิริยาของชาร์กับทาร์ และการแตกตัวของทาร์และรีฟอร์มแก๊สมีเทนดังปฏิกิริยา Tar cracking และ Methane reforming ^[37]

ส่วนผลการทดลองการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโดยไม่มียูคาลิปตัส เปรียบเทียบกับการใช้ไอน้ำและไม่ใช้ไอน้ำ พบว่า ผลิตภัณฑ์แก๊สที่ได้เพิ่มขึ้นเล็กน้อย ทั้งนี้เนื่องจาก ถ่านหินลิกไนต์ที่ใช้เป็นตัวรองรับตัวเร่งปฏิกิริยา เมื่อผ่านการไพโรไลซิส กลายเป็นถ่านชาร์แล้ว จะเหลือต่อการทำปฏิกิริยาดังเห็นได้จากผลการทดลองการแกสซิฟายของตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลบนถ่านหินลิกไนต์ โดยไม่ใช้ยูคาลิปตัส พบว่าผลิตภัณฑ์แก๊สแต่ละชนิดที่เกิดขึ้นมีค่าน้อยมากและได้ผลิตภัณฑ์แก๊สรวมเท่ากับ 15.75 มิลลิโมล ซึ่งในทุกการทดลองได้ทำการหักลบปริมาณแก๊สรวมของตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลบนถ่านหินลิกไนต์ผสมกับไอน้ำออกจากการแกสซิฟิเคชันของยูคาลิปตัสแล้ว

ส่วนผลของการทดลองการใช้ถ่านหินเปล่าโดยไม่มีการเติมนิกเกิล พบว่าปริมาณผลิตภัณฑ์แก๊สที่ได้มีค่าน้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับผลิตภัณฑ์แก๊สที่ได้จากการแกสซิฟิเคชันของยูคาลิปตัสโดยมีการเติมไอน้ำ และตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลบนถ่านหินลิกไนต์ จึงถือได้ว่าถ่านหินลิกไนต์ที่ใช้เป็นตัวรองรับตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลที่ใช้ในการทดลองนี้ ไม่มีผลต่อการแกสซิฟิเคชันของยูคาลิปตัสด้วยไอน้ำแบบมีตัวเร่งปฏิกิริยา

จากผลการทดลองทั้งหมดข้างต้น พบว่าไอน้ำ และตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลบนถ่านหินลิกไนต์มีผลทำให้องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊สแต่ละชนิด และผลรวมของผลิตภัณฑ์แก๊สมีค่าเพิ่มขึ้นมากกว่าการไม่ใช้ทั้งไอน้ำ และตัวเร่งปฏิกิริยาอย่างเห็นได้ชัด จึงได้ทำการทดลองต่อโดยทำการผลิตแก๊สไฮโดรเจนจากยูคาลิปตัสโดยแกสซิฟิเคชันด้วยไอน้ำแบบมีตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลบนถ่าน

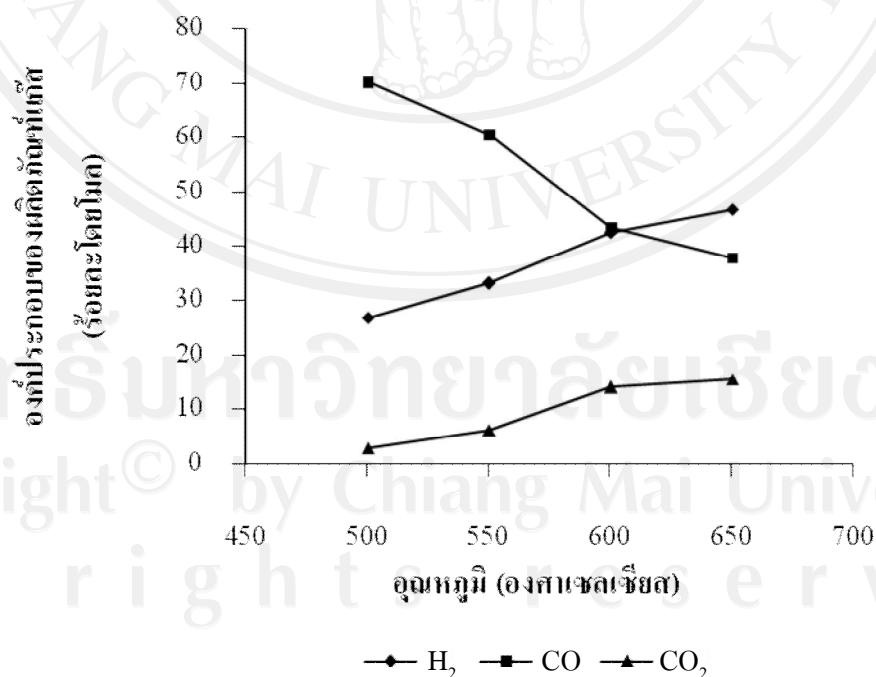
หินลิกไนต์เพื่อศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิในช่วง 500-650 องศาเซลเซียส ที่มีผลต่อผลิตภัณฑ์แก๊ส ในกระบวนการแก๊สซิเคชัน

3.5 ผลการศึกษาอุณหภูมิที่เหมาะสมในการผลิตแก๊สไฮโดรเจนจากยูคาลิปตัส โดยแก๊สซิเคชันด้วยไอน้ำแบบมีตัวเร่งปฏิกิริยา

ศึกษาอุณหภูมิที่เหมาะสมในการผลิตไฮโดรเจนจากยูคาลิปตัสโดยแก๊สซิเคชันด้วยไอน้ำแบบมีตัวเร่งปฏิกิริยา ทำการทดลองที่อุณหภูมิ 500, 550, 600 และ 650 องศาเซลเซียส ความดันไอน้ำที่ใช้ 30 กิโลปาสกาล ใช้ยูคาลิปตัสประมาณ 1 กรัม และอัตราส่วนโดยมวลของยูคาลิปตัสต่อตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลบนถ่านหินลิกไนต์ 1:1

3.5.1 ผลการศึกษาอุณหภูมิต่อองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊สแต่ละชนิด

จากผลการศึกษาอุณหภูมิช่วง 500, 550, 600 และ 650 องศาเซลเซียส พบว่าองค์ประกอบหลักของแก๊สผลิตภัณฑ์ที่ได้ คือ ไฮโดรเจน คาร์บอนมอนอกไซด์ และคาร์บอนไดออกไซด์ ส่วนแก๊สที่เป็นไฮโดรคาร์บอน และมีเทน แทบไม่มีเลย จึงสมมติให้ ผลิตภัณฑ์แก๊สประกอบด้วยไฮโดรเจน คาร์บอนมอนอกไซด์ และคาร์บอนไดออกไซด์ โดยที่ผลรวมของแก๊สทั้ง 3 ชนิด เท่ากับ 100 แสดงดังรูป 3.7



รูป 3.7 ผลการศึกษาองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊สแต่ละชนิดที่อุณหภูมิ 500, 550, 600 และ 650 องศาเซลเซียส

จากผลการทดลองในรูป 3.7 พบว่าผลของอุณหภูมิเป็นปัจจัยสำคัญในกระบวนการแกสซิฟิเคชันของยูคาลิปตัสด้วยไอน้ำแบบมีตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลบนถ่านหินลิกไนต์ จะเห็นได้ว่าในช่วงอุณหภูมิ 500, 550, 600 และ 650 องศาเซลเซียส องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊สมีการเปลี่ยนแปลงอย่างเห็นได้ชัด ดังนี้คือ ไฮโดรเจน และคาร์บอนไดออกไซด์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 26.94 เป็น 46.68 และจาก 2.86 เป็น 15.61 โดยโมลตามลำดับ ส่วนคาร์บอนมอนอกไซด์มีแนวโน้มลดลงอย่างเห็นได้ชัด จากร้อยละ 70.21 เป็น 37.71 โดยโมล

สามารถอธิบายได้จากปฏิกิริยา Steam reforming ปฏิกิริยา Primary water gas ปฏิกิริยา Secondary water gas และปฏิกิริยา Water-gas shift ซึ่งในช่วงอุณหภูมิ 500-600 องศาเซลเซียส ปฏิกิริยา Steam reforming , Primary และ Secondary water gas ดังสมการ 3.3, 3.9 และ 3.10 จะเด่นดังจะเห็นได้จากมีผลิตภัณฑ์เป็นแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ และไฮโดรเจนเกิดขึ้นค่อนข้างมาก จากนั้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิสูงขึ้นจาก 600 เป็น 650 องศาเซลเซียส ปฏิกิริยา Water-gas shift จะเด่นเนื่องจากเป็นปฏิกิริยาคูดความร้อน ซึ่งจะเกิดปฏิกิริยาได้ดีในช่วงอุณหภูมิสูง ดังจะเห็นได้จากมีผลิตภัณฑ์แก๊สไฮโดรเจน และคาร์บอนไดออกไซด์เกิดขึ้น ส่วนคาร์บอนมอนอกไซด์ลดลงอย่างเห็นได้ชัดเนื่องจากถูกใช้ในการทำปฏิกิริยากับไอน้ำ ซึ่งที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส เป็นสภาวะที่สามารถผลิตไฮโดรเจนได้มากที่สุด คือ ร้อยละ 46.68 โดยโมล และให้อัตราส่วน H_2/CO สูงที่สุดที่ 1.24 ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของสุพัตรา^[19] ที่ทำการศึกษาเรื่อง แก๊สสังเคราะห์จากยูคาลิปตัส พบว่า เมื่อเพิ่มอุณหภูมิจาก 500 เป็น 800 องศาเซลเซียส มีผลทำให้ปริมาณของแก๊สไฮโดรเจนเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นผลมาจากปฏิกิริยา Steam reforming, Primary water gas, Secondary water gas, และ Water-gas shift เป็นต้น

Primary water gas:

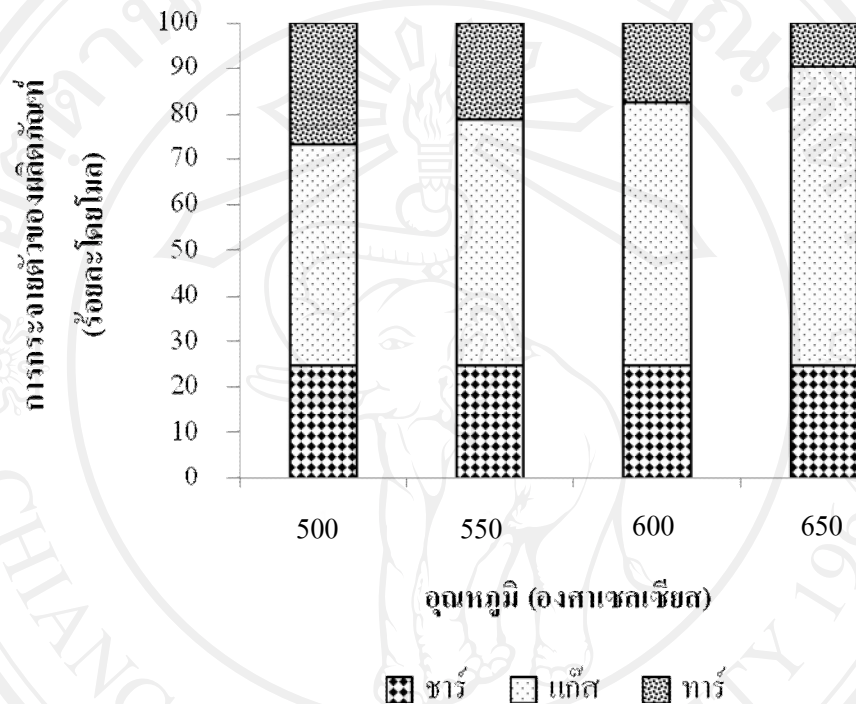


Secondary water gas:



3.5.2 ผลการศึกษาอุณหภูมิที่มีผลต่อการกระจายตัวของผลิตภัณฑ์ทั้งหมด

ศึกษาอุณหภูมิที่มีผลต่อการกระจายตัวของผลิตภัณฑ์ทั้งหมดที่อุณหภูมิ 500-650 องศาเซลเซียส อัตราส่วนยูคาลิปตัสต่อตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลบนถ่านหินลิกไนต์เท่ากับ 1:1 และความดันไอน้ำ 30 กิโลปาสกาล



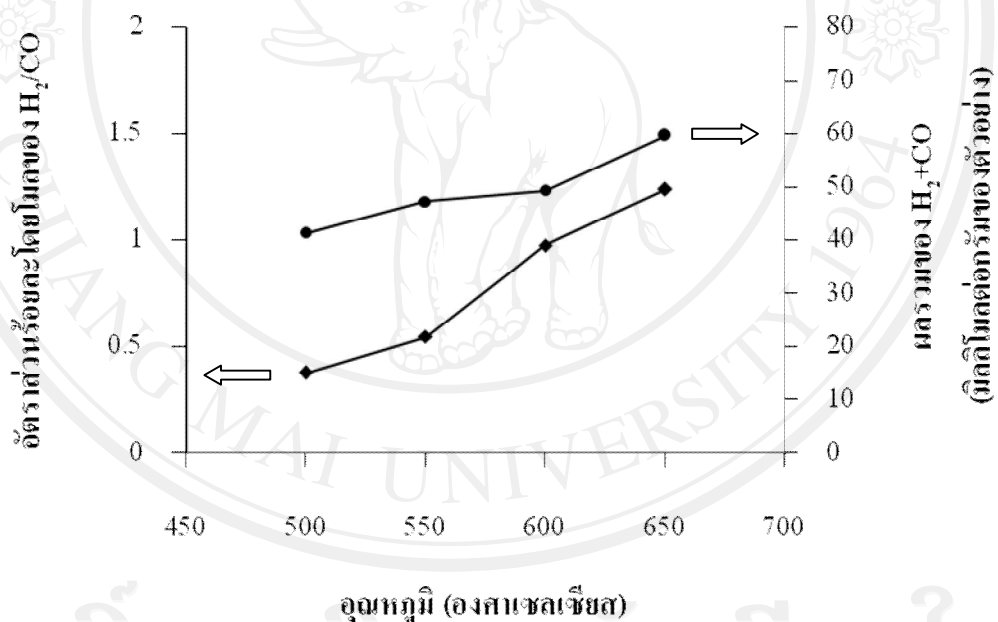
รูป 3.8 ผลของอุณหภูมิ 500-650 องศาเซลเซียส ที่มีผลต่อการกระจายตัวของผลิตภัณฑ์แก๊สทั้งหมด โดยใช้ไอน้ำ และตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลบนถ่านหินลิกไนต์

เมื่อพิจารณาผลของอุณหภูมิที่มีผลต่อการกระจายตัวของร้อยละผลิตภัณฑ์ทั้งหมด ในการแกสซิฟิเคชันของยูคาลิปตัสด้วยไอน้ำแบบมีตัวเร่งปฏิกิริยา แสดงดังรูป 3.8 พบว่า เมื่อทำการเพิ่มอุณหภูมิจาก 500 เป็น 650 องศาเซลเซียส ปริมาณชาร์ของยูคาลิปตัสมีค่าค่อนข้างคงที่ เนื่องจากบรรจุอยู่ในเครื่องไล่สารระเหย (Devolatilizer) ซึ่งมีการให้อุณหภูมิคงที่ที่ 700 องศาเซลเซียส ในการทดลองทุกครั้ง อีกทั้งชาร์ของยูคาลิปตัสไม่ได้สัมผัสกับไอน้ำ และตัวเร่งปฏิกิริยาโดยตรง จะมีเพียงสารระเหยได้ และทาร์จากยูคาลิปตัสเท่านั้นที่ถูกผ่านเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์ตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalytic reactor) ดังนั้นชาร์จึงมีปริมาณค่อนข้างคงที่ในทุกการทดลอง ส่วนปริมาณทาร์มีแนวโน้มลดลง และปริมาณแก๊สมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น สามารถอธิบายได้ว่า ปริมาณไฮโดรคาร์บอนจากสารระเหยได้ และทาร์ของยูคาลิปตัส เมื่อเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์ตัวเร่งปฏิกิริยาแล้ว เกิดการแตกตัว

ไปเป็นผลิตภัณฑ์แก๊ส และไฮโดรคาร์บอนเบาเพิ่มขึ้น เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ซึ่งอาจเป็นผลมาจากปฏิกิริยา Catalytic steam gasification of biomass tar และปฏิกิริยา Tar cracking ทั้งนี้ในการทำแกสซิฟิเคชันต้องการผลิตแก๊สไฮโดรเจน และคาร์บอนมอนอกไซด์มาก ซึ่งสามารถพิจารณาในแง่ขององค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊สได้จากหัวข้อ 3.5.1

3.5.3 ผลการศึกษาอุณหภูมิที่มีผลต่ออัตราส่วนร้อยละโดยโมลของ H_2/CO และ ผลรวมของ H_2+CO

จากอิทธิพลของอุณหภูมิที่มีผลต่อผลิตภัณฑ์แก๊สที่ได้จากการแกสซิฟิเคชันของยูคาลิปตัสด้วยไอน้ำแบบมีตัวเร่งปฏิกิริยา ผลการศึกษาอุณหภูมิที่มีผลต่ออัตราส่วนร้อยละโดยโมลของ H_2/CO และผลรวมของ H_2+CO แสดงดังรูป 3.9

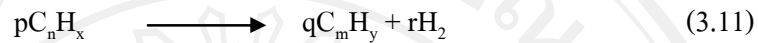


รูป 3.9 ผลของอุณหภูมิ 500 – 650 องศาเซลเซียส ที่มีต่ออัตราส่วนของ H_2/CO และผลรวมของ H_2+CO

เมื่อพิจารณาผลของอุณหภูมิต่ออัตราส่วนร้อยละโดยโมลของ H_2/CO และผลรวมของ H_2+CO จากกระบวนการแกสซิฟิเคชันของยูคาลิปตัส แสดงดังรูป 3.9 พบว่าอุณหภูมิเป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อสัดส่วนของแก๊สแต่ละชนิด โดยเมื่อทำการเพิ่มอุณหภูมิจาก 500 เป็น 650 องศาเซลเซียส ปริมาณของไฮโดรเจนมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ส่วนปริมาณของคาร์บอนมอนอกไซด์มีแนวโน้มลดลง จึงทำให้อัตราส่วนร้อยละโดยมวลของ H_2/CO เพิ่มขึ้นจาก 0.38 เป็น 1.24 สามารถอธิบายได้ว่า

ไฮโดรคาร์บอน และทำให้เกิดการแตกตัวไปเป็นไฮโดรเจนเพิ่มขึ้นที่อุณหภูมิสูงขึ้น ซึ่งอาจเกิดจากปฏิกิริยา Thermal cracking แสดงดังสมการ 3.11 ที่เป็นปฏิกิริยาคูดความร้อน เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นปฏิกิริยาจะเกิดไปข้างหน้า

Thermal cracking:



ในส่วนของผลรวม H_2+CO เมื่อเพิ่มอุณหภูมิจาก 500 เป็น 650 องศาเซลเซียส พบว่ามีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจาก 41.51 เป็น 59.75 มิลลิโมลต่อกรัมของตัวอย่าง จากผลการทดลอง แสดงให้เห็นว่าในการผลิตแก๊สไฮโดรเจนจากยูคาลิปตัสโดยแก๊สฟิเคชันด้วยไอน้ำแบบมีตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลบนถ่านหินลิกไนต์ สามารถให้ผลิตภัณฑ์ที่เป็นแก๊สสังเคราะห์ คือ ไฮโดรเจน กับคาร์บอนมอนอกไซด์เป็นส่วนใหญ่ แต่ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ว่าต้องการไฮโดรเจน หรือคาร์บอนมอนอกไซด์เป็นผลิตภัณฑ์หลัก สำหรับงานวิจัยนี้ต้องการไฮโดรเจนเป็นผลิตภัณฑ์หลัก ซึ่งจากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส มีอัตราส่วน ร้อยละโดยมวลของ H_2/CO สูงที่สุด ที่ 1.24 และผลรวมของ H_2+CO สูงที่สุดที่ 59.75 มิลลิโมลต่อกรัมของตัวอย่าง

3.5.4 ผลของอุณหภูมิต่อร้อยละสารป้อนที่ทำปฏิกิริยาไปของยูคาลิปตัส และร้อยละผลิตภัณฑ์ที่ได้ต่อสารป้อนที่ทำปฏิกิริยาไปของผลิตภัณฑ์แก๊ส

ผลการศึกษาอุณหภูมิต่ำ 500, 550, 600 และ 650 องศาเซลเซียสที่มีผลต่อร้อยละสารป้อนที่ทำปฏิกิริยาไปของยูคาลิปตัส และร้อยละผลิตภัณฑ์ที่ได้ต่อสารป้อนที่ทำปฏิกิริยาไปของผลิตภัณฑ์แก๊สแต่ละชนิด แสดงดังรูป 3.10 (ก) และ (ข) โดยที่

ร้อยละสารป้อนที่ทำปฏิกิริยาไป (% Conversion)

$$= \left[\frac{\text{น้ำหนักยูคาลิปตัสตั้งต้น} - \text{น้ำหนักของยูคาลิปตัสที่เหลือ}}{\text{น้ำหนักยูคาลิปตัสตั้งต้น}} \right] \times 100$$

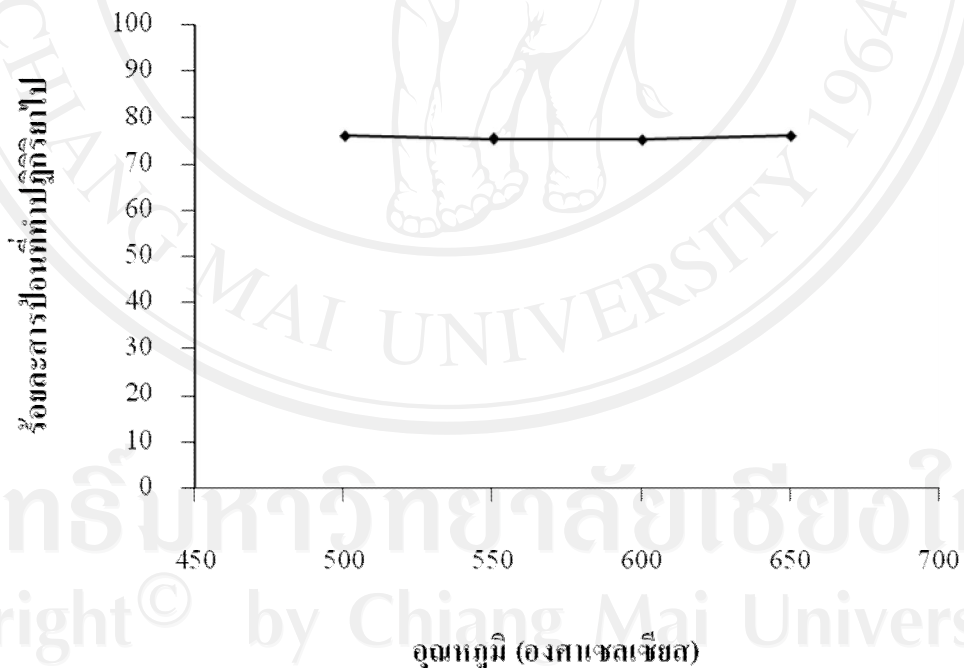
ร้อยละผลิตภัณฑ์ที่ได้ (% Yield)

$$= \frac{\text{ผลิตภัณฑ์แก๊สแต่ละชนิด} \times 100}{\text{ผลรวมของแก๊สทั้งหมด}}$$

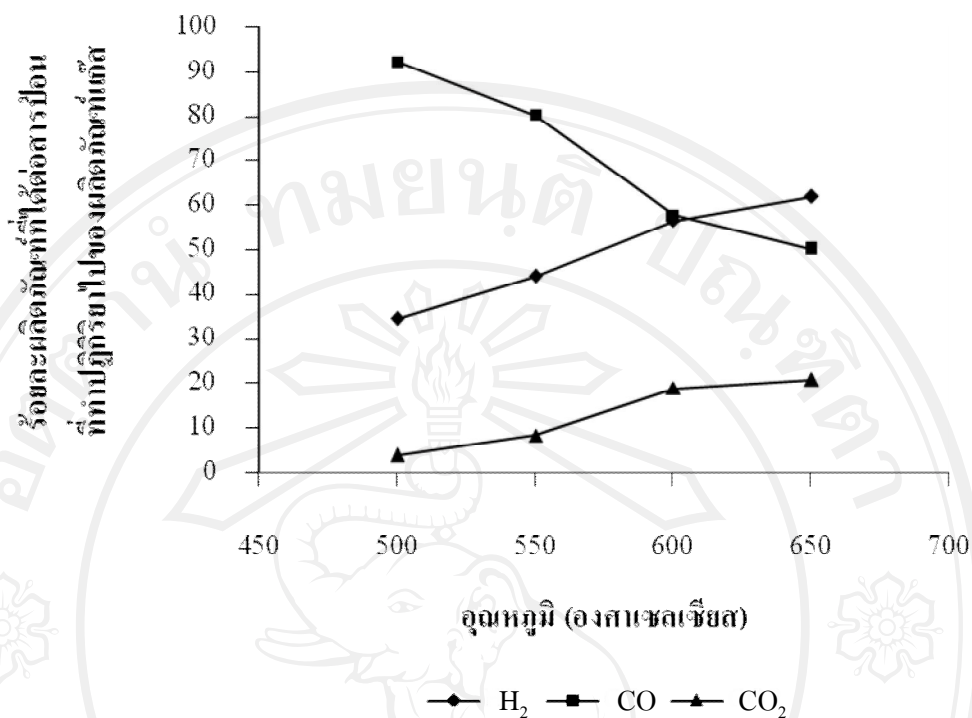
ร้อยละผลิตภัณฑ์ที่ได้ต่อสารป้อนที่ทำปฏิกิริยาไป (% Selectivity)

$$= \frac{\text{ผลิตภัณฑ์ที่ได้} \times 100}{\text{สารป้อนที่ทำปฏิกิริยาไป}}$$

ผลรวมของแก๊สทั้งหมดคิดจากผลรวมของแก๊สไฮโดรเจน คาร์บอนมอนอกไซด์ และ คาร์บอนไดออกไซด์



รูป 3.10 (ก) ร้อยละสารป้อนที่ทำปฏิกิริยาไปของยูคาลิปตัส



รูป 3.10 (ข) ผลของอุณหภูมิต่อร้อยละผลิตภัณฑ์ที่ได้ต่อสารป้อนที่ทำปฏิกิริยาไปของผลิตภัณฑ์แก๊ส

จากรูป 3.10 (ก) พบว่า ร้อยละสารป้อนที่ทำปฏิกิริยาไปของยูคาลิปตัส มีค่าใกล้เคียงกัน ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่ายูคาลิปตัสมีการเปลี่ยนไปเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆ คือ แก๊ส และทาร์ในขั้นตอนการไล่สารระเหย ซึ่งมีการให้อุณหภูมิที่ 700 องศาเซลเซียส และอัตราการให้ความร้อน (Heating rate) ที่ 10 องศาเซลเซียส คงที่ในทุกการทดลอง เพื่อให้สารระเหยได้จากยูคาลิปตัสนั้นเข้าไปทำปฏิกิริยากับตัวเร่งปฏิกิริยาที่อยู่ในเครื่องปฏิกรณ์ตัวเร่งปฏิกิริยาได้ในสัดส่วนที่ใกล้เคียงกัน จึงทำให้ร้อยละสารป้อนที่ทำปฏิกิริยาไป มีค่าใกล้เคียงกันในทุกช่วงอุณหภูมิ

ส่วนร้อยละผลิตภัณฑ์ที่ได้ต่อสารป้อนที่ทำปฏิกิริยาไปของไฮโดรเจนที่ 650 องศาเซลเซียส มีปริมาณมากที่สุดคือ ร้อยละ 61.94 และปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์น้อยที่สุด คือ ร้อยละ 50.04 ซึ่งสามารถอธิบายได้จากปฏิกิริยาของแก๊สฟิเคชันต่างๆ ดังที่ได้กล่าวมาแล้ว

จากผลการทดลอง แสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิที่เหมาะสมในการผลิตไฮโดรเจนให้ได้ปริมาณมากที่สุดในการแก๊สฟิเคชันของยูคาลิปตัสด้วยไอน้ำ แบบมีตัวเร่งปฏิกิริยา คือ ที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส เนื่องจากเป็นจุดแรก ที่มีปริมาณไฮโดรเจนมากกว่า คาร์บอนมอนอกไซด์ และมี

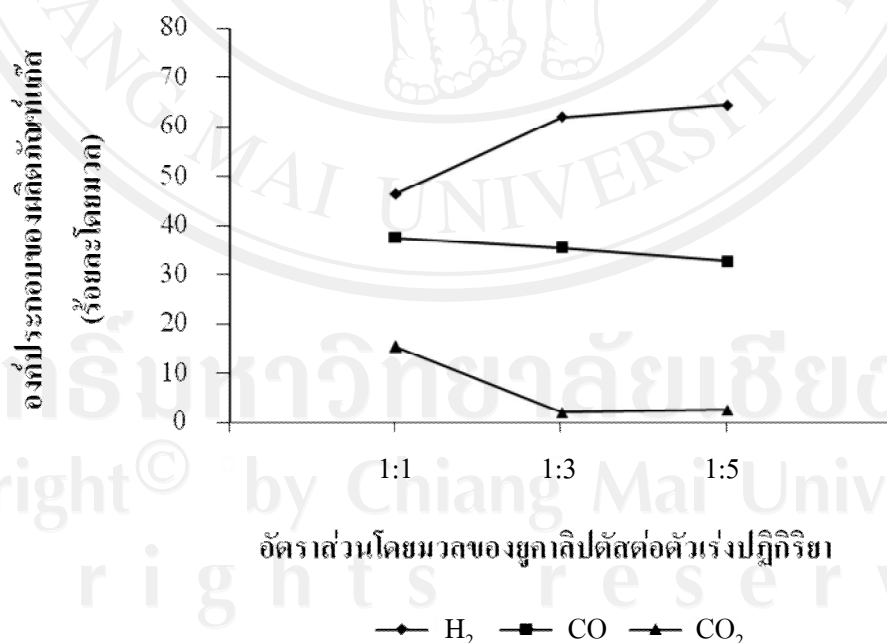
อัตราส่วนของ H_2/CO มากกว่า 1.0 ดังนั้นจึงใช้อุณหภูมินี้ในการศึกษาอัตราส่วนโดยมวลของยูคาลิปตัสต่อตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหมาะสมที่สุด เพื่อที่จะให้ได้ผลิตภัณฑ์แก๊ส โดยเฉพาะไฮโดรเจนให้มากที่สุด ต่อไป

3.6 ผลการศึกษาการหาอัตราส่วนโดยมวลของยูคาลิปตัสต่อตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหมาะสมในการผลิตแก๊สไฮโดรเจนจากยูคาลิปตัส โดยแก๊สฟิเคชันด้วยไอน้ำแบบมีตัวเร่งปฏิกิริยา

ศึกษาผลของอัตราส่วนโดยมวลของยูคาลิปตัสต่อตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลบนถ่านหินลิกไนต์ที่อัตราส่วน 1:1, 1:3 และ 1:5 อุณหภูมิที่ใช้ในการทดลอง 650 องศาเซลเซียส อัตราการป้อนไอน้ำ 30 กิโลปาสกาล และยูคาลิปตัสประมาณ 1 กรัม

3.6.1 ผลการศึกษาอัตราส่วนโดยมวลของยูคาลิปตัสต่อตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลบนถ่านหินลิกไนต์ที่มีต่อองค์ประกอบของแก๊สผลิตภัณฑ์

จากผลการศึกษาอัตราส่วนโดยมวลของยูคาลิปตัสต่อตัวเร่งปฏิกิริยา มีผลต่อองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊สแต่ละชนิด คือ ไฮโดรเจน คาร์บอนมอนอกไซด์ และคาร์บอนไดออกไซด์ แสดงดังรูป 3.11



รูป 3.11 ผลของอัตราส่วนโดยมวลของยูคาลิปตัสต่อตัวเร่งปฏิกิริยา ที่มีต่อองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊ส

จากผลการทดลองพบว่า อัตราส่วนโดยมวลของยูคาลิปตัสต่อตัวเร่งปฏิกิริยาที่เพิ่มขึ้นจาก 1:1 เป็น 1:5 มีผลทำให้ปริมาณไฮโดรเจนเพิ่มขึ้นร้อยละ 46.68 เป็น 64.48 เนื่องจากการเพิ่มปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลบนถ่านหินลิกไนต์ทำให้ตำแหน่งที่ถูกกระตุ้น (Active site) มีมากขึ้น ซึ่งนิกเกิลเป็นโลหะที่ว่องไวต่อปฏิกิริยา โดยตำแหน่งที่ถูกกระตุ้น คือตำแหน่งที่ตัวเร่งปฏิกิริยาจับกับคาร์บอน ที่ช่วยเร่งปฏิกิริยาการเกิดไฮโดรเจนได้มากขึ้น ดังสมการ 3.5 และ 3.6 (หน้า 61) นอกจากนี้ นิกเกิลยังช่วยในการแตกตัวของทาร์ และปฏิกิริยา Reforming ได้ดีจึงทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่เป็นไฮโดรเจนเพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ อนวรรตน์^[34] ที่ทำการศึกษาเรื่องแก๊สซิเคชันของไม้ยูคาลิปตัสบนตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิล/โคโลไมต์ พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณร้อยละของนิกเกิล จะทำให้องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊สเพิ่มขึ้น

ส่วนคาร์บอนไดออกไซด์มีแนวโน้มที่ลดลง เมื่อเพิ่มอัตราส่วนโดยมวลของยูคาลิปตัสต่อตัวเร่งปฏิกิริยาจาก 1:1 เป็น 1:5 อาจเนื่องมาจากปฏิกิริยา Boudouard ดังสมการ 3.12 และ 3.13 ซึ่งเป็นปฏิกิริยาคูดความร้อน และจัดเป็นปฏิกิริยาพื้นฐานของการผลิตโปรดิวเซอร์แก๊ส (Producer gas) โดยคาร์บอนไดออกไซด์จะทำปฏิกิริยากับคาร์บอนที่มากเกินไป (Excess carbon) ในอนุภาคของแข็ง เกิดเป็นคาร์บอนมอนอกไซด์ และปฏิกิริยา CO_2 reforming ดังสมการ 3.13 ทั้งนี้เนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาในระหว่างกระบวนการแก๊สซิเคชันมีความซับซ้อนมาก และสามารถเกิดได้หลายปฏิกิริยา ผลิตภัณฑ์แก๊สที่ได้จึงขึ้นอยู่กับอิทธิพลหลายปัจจัย เช่น อุณหภูมิ ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา และอัตราการป้อนไอน้ำ เป็นต้น

Boudouard:

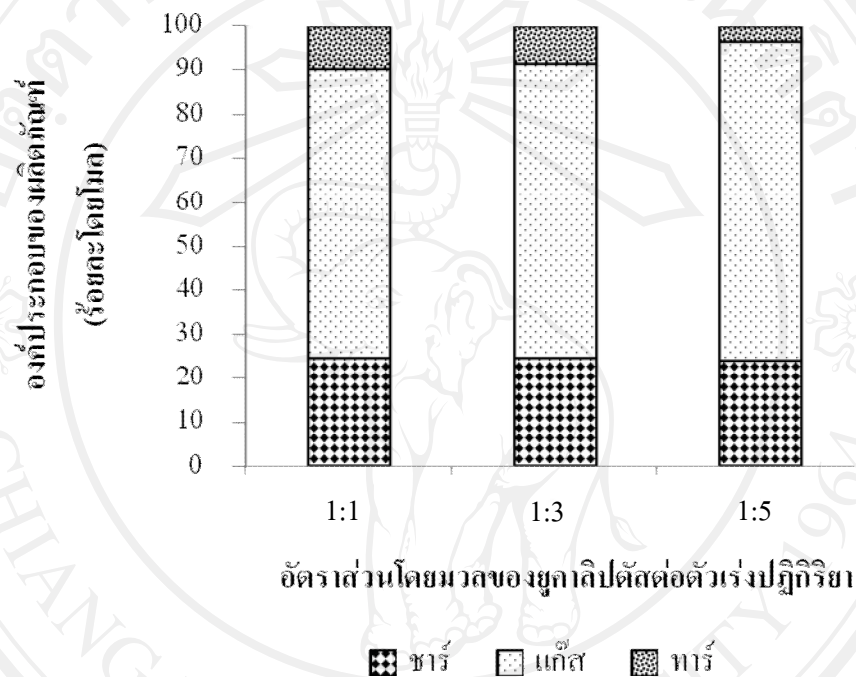


CO_2 reforming:



3.6.2 ผลของอัตราส่วนโดยมวลของยูคาลิปตัสต่อตัวเร่งปฏิกิริยา ที่มีผลต่อการกระจายตัวของผลิตภัณฑ์

ผลการศึกษาอัตราส่วนโดยมวล ของยูคาลิปตัสต่อตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลบนถ่านหินลิกไนต์ ที่อัตราส่วน 1:1, 1:3 และ 1:5 อุณหภูมิที่ใช้ทำการทดลอง 650 องศาเซลเซียส อัตราการป้อนไอน้ำ 30 กิโลปาสกาล และยูคาลิปตัสประมาณ 1 กรัม



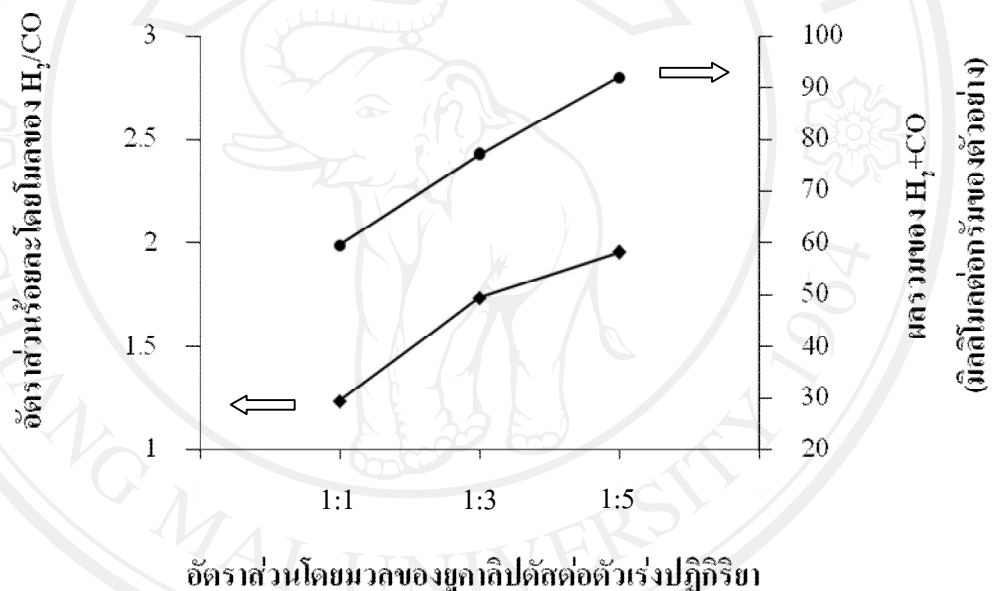
รูป 3.12 ผลของอัตราส่วนโดยมวลของยูคาลิปตัสต่อตัวเร่งปฏิกิริยา ที่มีผลต่อร้อยละการกระจายตัวของผลิตภัณฑ์

เมื่อพิจารณาผลของอัตราส่วนโดยมวลของยูคาลิปตัสต่อตัวเร่งปฏิกิริยา ที่มีผลต่อการกระจายตัวของผลิตภัณฑ์ แสดงดังรูป 3.12 พบว่า เมื่อทำการเพิ่มอัตราส่วนโดยมวลของยูคาลิปตัสต่อตัวเร่งปฏิกิริยาจาก 1:1 เป็น 1:5 ปริมาณชาร์มีค่าค่อนข้างคงที่ ส่วนผลิตภัณฑ์แก๊สเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 65.77 เป็น 72.46 โดยโมล และทาร์ลดลงจากร้อยละ 9.59 เป็น 3.62 โดยโมล ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่า เนื่องจากชาร์ที่ได้ ไม่ได้สัมผัสกับไอน้ำโดยตรง มีเพียงผลิตภัณฑ์แก๊ส และทาร์ที่ได้จากขั้นตอนการไพโรไลซิสเท่านั้นที่ได้สัมผัสกับไอน้ำ และตัวเร่งปฏิกิริยา เพื่อเปลี่ยนไปเป็นผลิตภัณฑ์แก๊สเพิ่มขึ้น ดังจะเห็นได้จากปริมาณของผลิตภัณฑ์แก๊สที่เพิ่มขึ้น และปริมาณทาร์ลดลง เป็นผลมาจากการเพิ่มอัตราส่วนของตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลบนถ่านหินลิกไนต์ จะทำให้บริเวณที่ถูกกระตุ้นมากขึ้นทำให้ได้ผลิตภัณฑ์แก๊สเพิ่มขึ้น และยังช่วยในการแตกตัวของทาร์อีกด้วย เนื่องจาก

ทาร์เป็นไฮโดรคาร์บอนโมเลกุลหนัก เมื่อเกิดการแตกตัว จึงทำให้ผลิตภัณฑ์แก๊สทั้ง 3 ชนิดเพิ่มขึ้น ซึ่งสามารถอธิบายได้จากสมการ Catalytic steam reforming of biomass tar และ Tar cracking

3.6.3 ผลการศึกษาอัตราส่วนโดยมวลของยูคาลิปตัสต่อตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลบนถ่านหินลิกไนต์ ที่มีผลต่ออัตราส่วนร้อยละโดยโมลของ H_2/CO และผลรวมของ H_2+CO

ผลการศึกษาอัตราส่วนโดยมวลของยูคาลิปตัสต่อตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลบนถ่านหินลิกไนต์ 1:1 1:3 และ 1:5 ที่มีผลต่ออัตราส่วนร้อยละโดยโมลของ H_2/CO และผลรวมของ H_2+CO แสดงดังรูป 3.13



รูป 3.13 ผลของอัตราส่วนร้อยละโดยโมลของยูคาลิปตัสต่อตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีผลต่ออัตราส่วนร้อยละโดยโมลของ H_2/CO และผลรวมของ H_2+CO

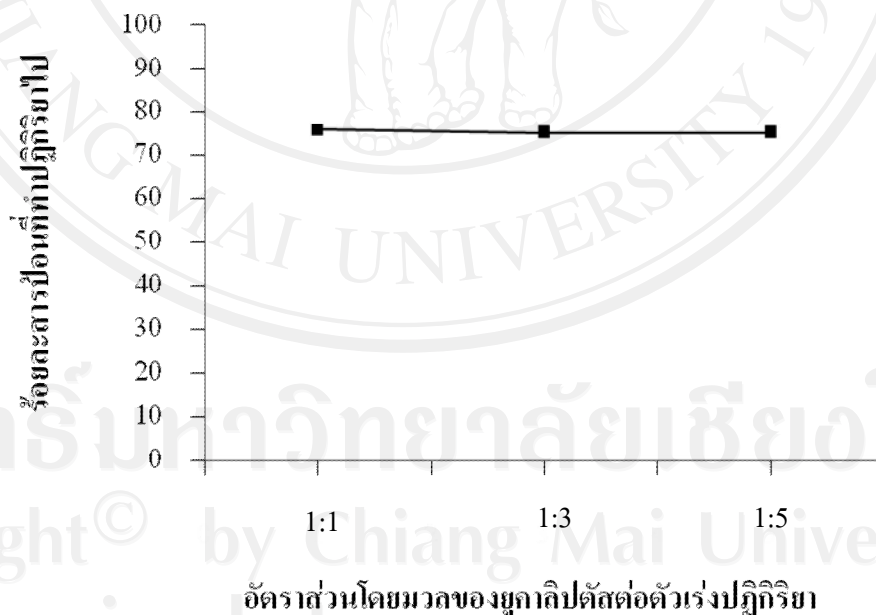
ผลการศึกษาอัตราส่วนโดยมวลของยูคาลิปตัสต่อตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลบนถ่านหินลิกไนต์ ที่มีผลต่ออัตราส่วนร้อยละโดยโมลของ H_2/CO และผลรวมของ H_2+CO แสดงดังรูป 3.13 พบว่าเมื่อเพิ่มอัตราส่วนโดยมวลของยูคาลิปตัสต่อตัวเร่งปฏิกิริยาจาก 1:1 เป็น 1:5 มีผลทำให้อัตราส่วนร้อยละโดยโมลของ H_2/CO มีค่าเพิ่มขึ้นจาก 1.24 เป็น 1.96 สามารถอธิบายได้ว่าการที่ไฮโดรเจนมีค่าเพิ่มขึ้นนั้น เกิดจากปฏิกิริยาต่างๆของแก๊สฟิเคชันเกือบทุกปฏิกิริยา เพราะเนื่องจากการเพิ่มตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นการเพิ่มพื้นที่ ของบริเวณที่ถูกกระตุ้นมากขึ้น จึงทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาต่างๆ ของแก๊สฟิเคชัน เพิ่มขึ้นตามไปด้วย ในส่วนของผลรวมของ H_2+CO เพิ่มขึ้นจาก 59.73 เป็น 92.19 มิลลิ-

โมลต่อกรัมของตัวอย่างเนื่องจากเกิดจากปฏิกิริยาต่างๆ ของแก๊สฟิเคชันดังที่ได้อธิบายไว้แล้วในหัวข้อ 3.6.1 และ 3.6.2

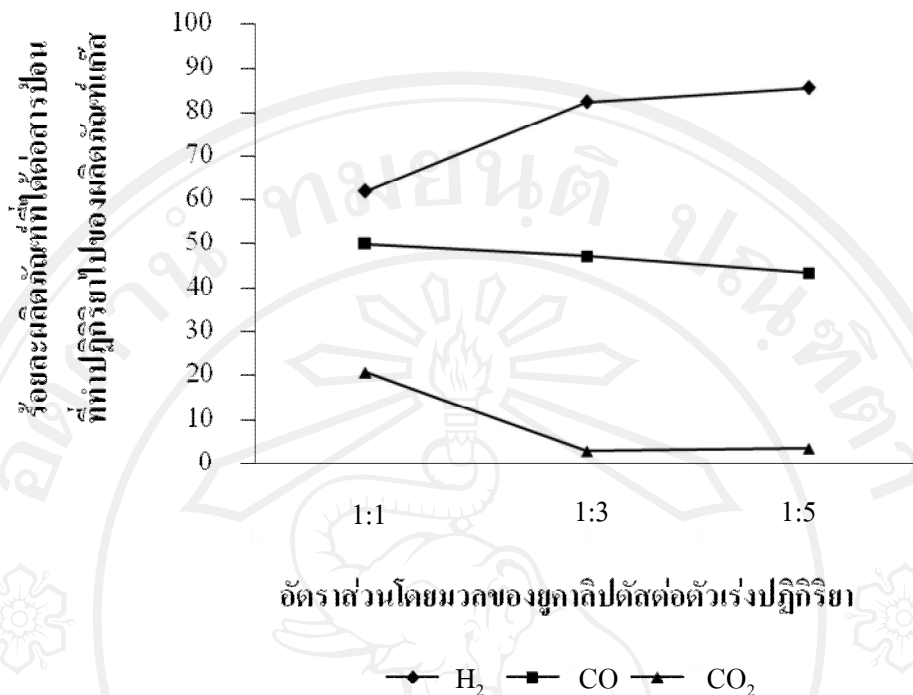
แต่ทั้งนี้เมื่อพิจารณาในหลักเศรษฐศาสตร์ การเพิ่มปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยามากเกินไป อาจทำให้เกิดความสิ้นเปลือง และไม่คุ้มทุน เนื่องจากตัวเร่งปฏิกิริยาค่อนข้างมีราคาสูง ดังนั้นจึงต้องพิจารณาถึงสภาวะที่เหมาะสม และความคุ้มทุนในการผลิตแก๊สเชื้อเพลิงจากกระบวนการแก๊สฟิเคชันด้วย

3.6.4 ผลของอัตราส่วนโดยมวลของยูคาลิปตัสต่อตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลบนถ่านหินลิกไนต์ต่อร้อยละสารป้อนที่ทำปฏิกิริยาไปของยูคาลิปตัส และร้อยละผลิตภัณฑ์ที่ได้ต่อสารป้อนที่ทำปฏิกิริยาไปของผลิตภัณฑ์แก๊ส

ผลการศึกษาอัตราส่วนโดยมวลของยูคาลิปตัสต่อตัวเร่งปฏิกิริยาที่อัตราส่วน 1:1, 1:3 และ 1:5 ที่มีผลต่อร้อยละสารป้อนที่ทำปฏิกิริยาไป ของยูคาลิปตัส และร้อยละผลิตภัณฑ์ที่ได้ต่อสารป้อนที่ทำปฏิกิริยาไปของผลิตภัณฑ์แก๊ส แสดงดังรูป 3.14



รูป 3.14 (ก) ผลของอัตราส่วนโดยมวลของยูคาลิปตัสต่อตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลบนถ่านหินลิกไนต์ต่อร้อยละสารป้อนที่ทำปฏิกิริยาไปของยูคาลิปตัส



รูป 3.14 (ข) ร้อยละผลิตภัณฑ์ที่ได้ต่อสารป้อนที่ทำปฏิกิริยาไปของผลิตภัณฑ์แก๊ส

จากรูป 3.14 (ก) พบว่าร้อยละสารป้อนที่ทำปฏิกิริยาไปมีค่าใกล้เคียงกัน ซึ่งสามารถอธิบายได้ ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่ายูคาลิปตัสมีการเปลี่ยนไปเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆ คือ แก๊ส และทาร์ในขั้นตอนการไล่สารระเหย ในปริมาณที่ค่อนข้างคงที่ เพื่อไปทำปฏิกิริยากับตัวเร่งปฏิกิริยาที่อยู่ในเครื่องปฏิกรณ์ตัวเร่งปฏิกิริยา ดังที่ได้อธิบายไว้แล้วในหัวข้อ 3.5.4

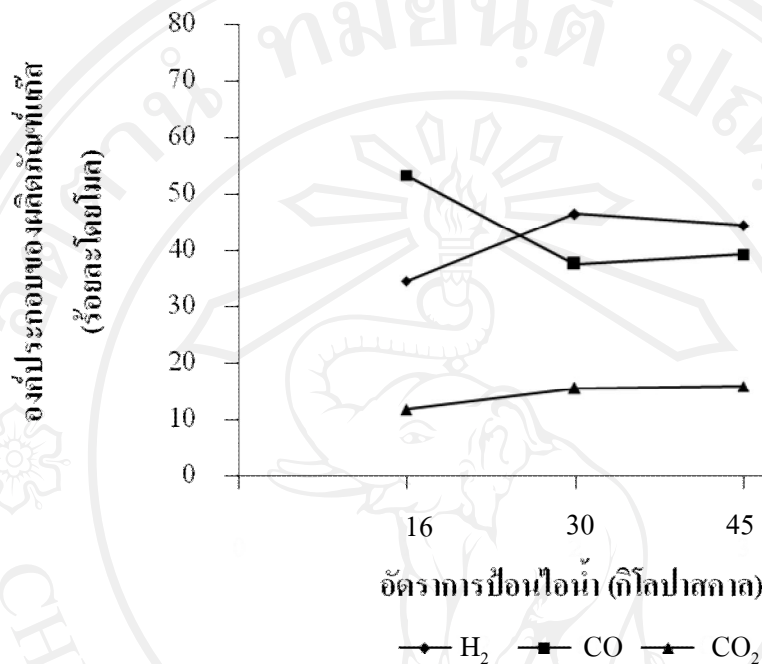
จากรูป 3.14 (ข) ร้อยละผลิตภัณฑ์ที่ได้ต่อสารป้อนที่ทำปฏิกิริยาไปของไฮโดรเจนที่อัตราส่วนโดยมวลของยูคาลิปตัสต่อตัวเร่งปฏิกิริยาเท่ากับ 1:5 มีปริมาณมากที่สุดคือ ร้อยละ 85.56 และปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์น้อยที่สุดคือ ร้อยละ 43.55 ซึ่งสามารถอธิบายได้จากปฏิกิริยาของแก๊สฟิเคชันต่างๆ ดังที่ได้กล่าวมาแล้ว ในหัวข้อ 3.6.1 – 3.6.3

3.7 ผลการศึกษาอัตราการป้อนไอน้ำที่เหมาะสมในการผลิตไฮโดรเจนจากยูคาลิปตัสโดยแก๊สฟิเคชันด้วยไอน้ำแบบมีตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลบนถ่านหินลิกไนต์

ศึกษาผลของอัตราการป้อนไอน้ำที่ 16, 30 และ 45 กิโลปาสกาล อุณหภูมิที่ใช้ในการทดลอง 650 องศาเซลเซียส อัตราส่วนร้อยละโดยมวลของยูคาลิปตัสต่อตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลบนถ่านหินลิกไนต์ที่ 1:1 และยูคาลิปตัสประมาณ 1 กรัม

3.7.1 ผลการศึกษาอัตราการป้อนไอน้ำต่อองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊สแต่ละชนิด

ศึกษาอัตราการป้อนไอน้ำที่ 16, 30 และ 45 กิโลปาสกาล อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส อัตราส่วนโดยมวลของยูคาลิปตัสต่อตัวเร่งปฏิกิริยาเท่ากับ 1:1 แสดงดังรูป 3.15



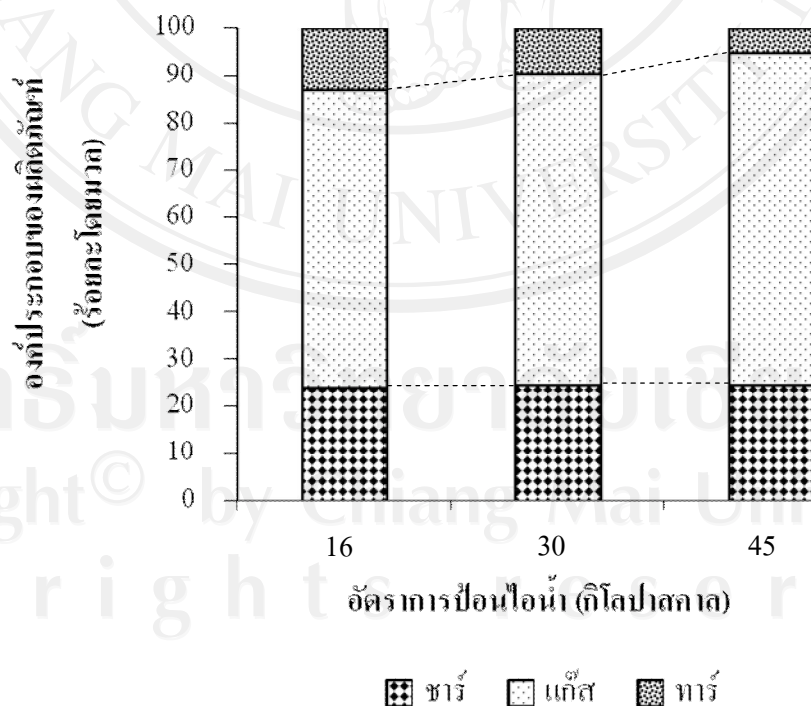
รูป 3.15 ผลการศึกษาอัตราการป้อนไอน้ำต่อองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊สแต่ละชนิด

จากผลการทดลองอัตราการป้อนไอน้ำ 16, 30 และ 45 กิโลปาสกาล แสดงดังรูป 3.15 จะเห็นว่า เมื่อเพิ่มอัตราการป้อนไอน้ำจาก 16 เป็น 30 กิโลปาสกาล ปริมาณไฮโดรเจน และ คาร์บอนไดออกไซด์ เพิ่มขึ้นจากร้อยละ 34.67 เป็น 46.68 และจาก 11.87 เป็น 15.61 โดยโมล ตามลำดับ ส่วนคาร์บอนมอนอกไซด์ลดลงจากร้อยละ 53.46 เป็น 37.71 โดยโมล ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่า การที่ปริมาณไฮโดรเจนเพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มอัตราการป้อนไอน้ำนั้น เนื่องจากไอน้ำจัดเป็นแหล่งใหญ่ที่ใช้ในกระบวนการ Steam gasification โดยมีปฏิกิริยาที่เกี่ยวข้องได้แก่ ปฏิกิริยา Primary water gas, Secondary water gas, Water-gas shift, Steam reforming และ Methane reforming ซึ่งจากทุกปฏิกิริยาจะมีไฮโดรเจนเกิดขึ้น ดังนั้นเมื่อเพิ่มอัตราการป้อนไอน้ำจึงทำให้เกิดไฮโดรเจนเพิ่มขึ้นตามไปด้วย และที่อัตราการป้อนไอน้ำ 16 กิโลปาสกาล นั้นปริมาณไอน้ำอาจจะไม่เพียงพอในการเกิดปฏิกิริยาต่างๆของกระบวนการ Steam gasification ได้อย่างเต็มที่ แต่เมื่อป้อนไอน้ำเพิ่มขึ้น จาก 30 เป็น 45 กิโลปาสกาล จากผลการทดลองพบว่า ปริมาณของผลิตภัณฑ์แก๊สรวมที่ได้จากการป้อนไอน้ำที่ 30 กิโลปาสกาลนั้นมีค่าค่อนข้างใกล้เคียงกับปริมาณของผลิตภัณฑ์แก๊สรวมที่

การป้อนไอน้ำ 45 กิโลปาสกาล คือ 70.80 และ 71.07 มิลลิโมลต่อกรัมของตัวอย่าง ตามลำดับ เนื่องจากการป้อนไอน้ำที่ 45 กิโลปาสคานั้น ไอน้ำอาจจะมากเกินไป (Excess steam) ในการเข้าไปทำปฏิกิริยา ซึ่งในการเกิดปฏิกิริยา สารตัวทำปฏิกิริยาจะทำปฏิกิริยากันในอัตราส่วนจำนวนโมลที่แน่นอน แต่ถ้าสารตัวทำปฏิกิริยาตัวใดตัวหนึ่งมีมากเกินไป และมีสารอีกตัวหนึ่งที่มีจำนวนโมลจำกัด เมื่อเกิดปฏิกิริยา สารตัวทำปฏิกิริยาที่มีปริมาณน้อยกว่าจะเป็นตัวกำหนดว่า ในการเกิดปฏิกิริยานั้นๆ จะเกิดสารผลิตภัณฑ์ได้อย่างมากที่สุดเท่าใด โดยที่สารที่มีปริมาณน้อยกว่าในปฏิกิริยา และเป็นสารที่ถูกใช้หมดไปในปฏิกิริยา คือ สารกำหนดปริมาณ (Limiting reactant) ดังจะเห็นได้จากปริมาณของผลิตภัณฑ์แก๊สรวมที่ได้มีค่าค่อนข้างใกล้เคียงกัน แม้จะเพิ่มอัตราการป้อนไอน้ำมากขึ้น ซึ่งแสดงให้เห็นว่า อัตราการป้อนไอน้ำที่เหมาะสมในการทดลองนี้คือที่ 30 กิโลปาสกาล

3.7.2 ผลการศึกษาอัตราการป้อนไอน้ำต่อร้อยละการกระจายตัวของผลิตภัณฑ์ทั้งหมด

ศึกษาการร้อยละการกระจายตัวของผลิตภัณฑ์ทั้งหมดที่อัตราการป้อนไอน้ำ 16, 30 และ 45 กิโลปาสกาล อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส อัตราส่วนยูคาลิปตัสต่อตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลบนถ่านหินลิกไนต์ เท่ากับ 1:1 แสดงดังรูป 3.16

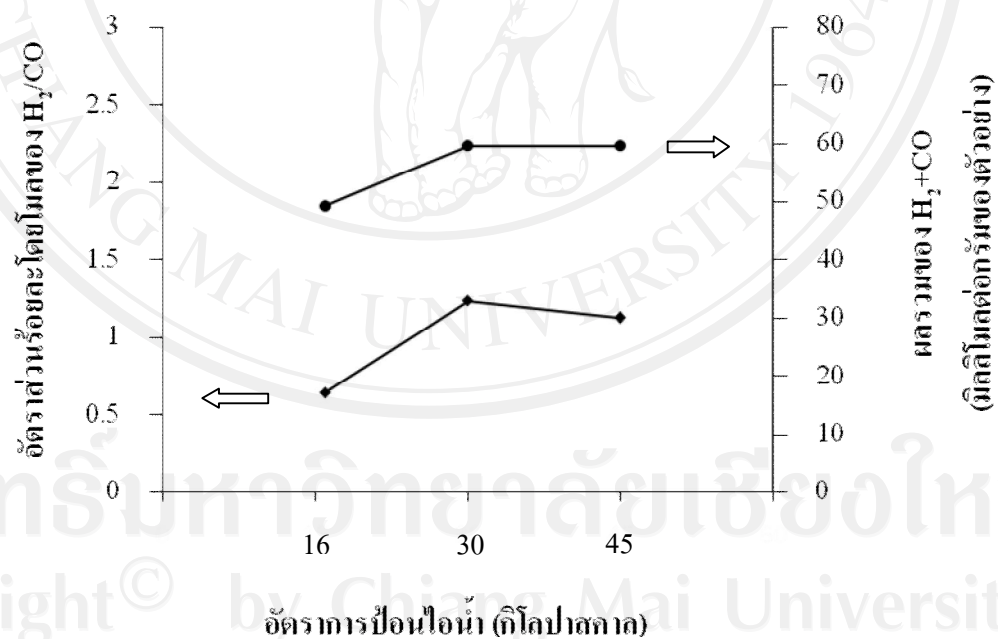


รูป 3.16 ผลการศึกษาอัตราการป้อนไอน้ำต่อร้อยละการกระจายตัวของผลิตภัณฑ์ทั้งหมด

จากผลการทดลอง พบว่า เมื่อพิจารณาผลของอัตราการป้อนไอน้ำที่มีผลต่อการกระจายตัวของผลิตภัณฑ์ทั้งหมด ที่อัตราการป้อนไอน้ำจาก 16 เป็น 45 กิโลปาสกาล ปริมาณคาร์บอนมีค่าค่อนข้างคงที่ เช่นเดียวกับที่ได้อธิบายไว้แล้วในหัวข้อ 3.6.2 ส่วนปริมาณแก๊สเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 62.77 เป็น 70.29 ส่วนปริมาณทาร์ลดลงจากร้อยละ 13.14 เป็น 5.07 อาจเนื่องมาจากปฏิกิริยาต่างๆของ Steam gasification และการที่ป้อนปริมาณไอน้ำที่เพิ่มขึ้น อาจส่งผลให้เกิดการแตกตัวของไฮโดรคาร์บอน และทาร์เพิ่มขึ้นตามไปด้วย เนื่องจากไอน้ำเป็นแหล่งผลิตของไฮโดรเจนในกระบวนการต่างๆของ Steam gasification จึงส่งผลให้ปริมาณของผลิตภัณฑ์แก๊สเพิ่มขึ้น และปริมาณทาร์ลดลง

3.7.3 ผลการศึกษาอัตราการป้อนไอน้ำที่มีผลต่ออัตราส่วนร้อยละโดยโมลของ H_2/CO และผลรวมของ H_2+CO

การศึกษาอัตราการป้อนไอน้ำ 16, 30 และ 45 กิโลปาสกาล อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส อัตราส่วนยูคาลิปตัสต่อตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลบนถ่านหินลิกไนต์ เท่ากับ 1:1 ที่มีผลต่ออัตราส่วนร้อยละโดยโมลของ H_2/CO และผลรวมของ H_2+CO แสดงดังรูป 3.17



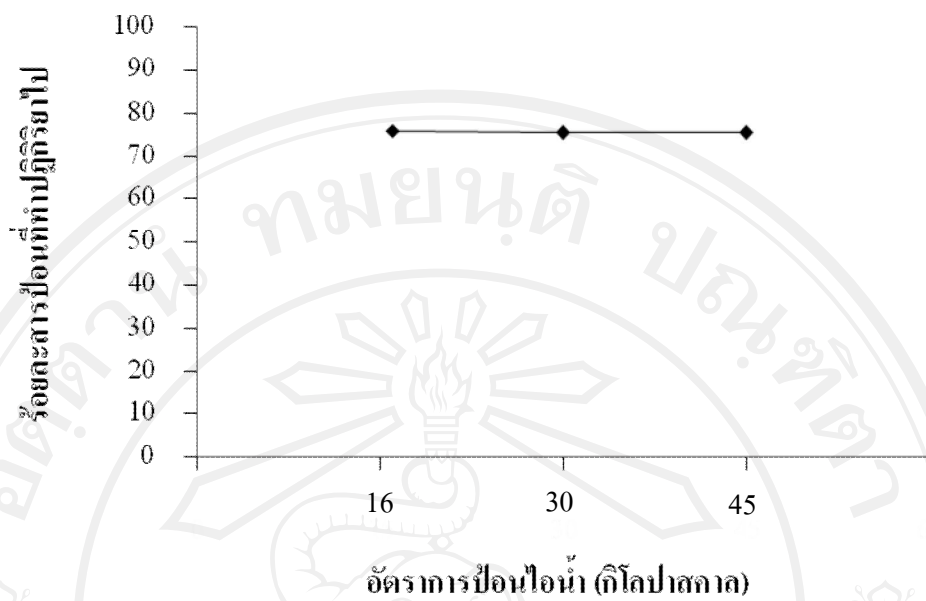
รูป 3.17 ผลการศึกษาอัตราการป้อนไอน้ำที่มีผลต่ออัตราส่วนร้อยละโดยโมลของ H_2/CO และผลรวมของ H_2+CO

จากผลการศึกษาอัตราการป้อนไอน้ำที่มีผลต่ออัตราส่วนร้อยละโดยโมลของ H_2/CO และผลรวมของ H_2+CO แสดงดังรูป 3.17 พบว่า เมื่อเพิ่มอัตราการป้อนไอน้ำจาก 16 เป็น 30 กิโลปาสคาลนั้น มีผลทำให้อัตราส่วนร้อยละโดยโมลของ H_2/CO เพิ่มขึ้นจาก 0.65 เป็น 1.24 และมีค่าสูงสุดที่ 1.24 เนื่องจากปฏิกิริยา Steam gasification ต่างๆที่ได้กล่าวไปแล้วในหัวข้อ 3.7.1 แต่เมื่อเพิ่มอัตราการป้อนไอน้ำจาก 30 เป็น 45 กิโลปาสคาล อัตราส่วนร้อยละโดยโมลของ H_2/CO ลดลงเล็กน้อย จาก 1.24 เป็น 1.13 อาจเนื่องมาจากการที่อัตราการป้อนไอน้ำ 45 กิโลปาสคาล นั้นอาจเกิดปฏิกิริยา Methane reforming ได้ผลิตภัณฑ์เป็นแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ และไฮโดรเจน จึงส่งผลให้ปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์เพิ่มขึ้นเล็กน้อย เมื่อคิดเป็นอัตราส่วนร้อยละโดยโมลของ H_2/CO จึงมีค่าลดลงเล็กน้อย ดังสมการ 3.8 (หน้า 61) แต่ทั้งนี้ในการทดลอง ไม่พบปริมาณของแก๊สมีเทน เนื่องจากในการวิเคราะห์หาปริมาณผลิตภัณฑ์เกิดจากการแกสซิฟิเคชันได้ใช้เทคนิคแก๊สโครมาโตกราฟ โดยใช้ดีเทคเตอร์แบบ TCD (Thermal conductivity detector)

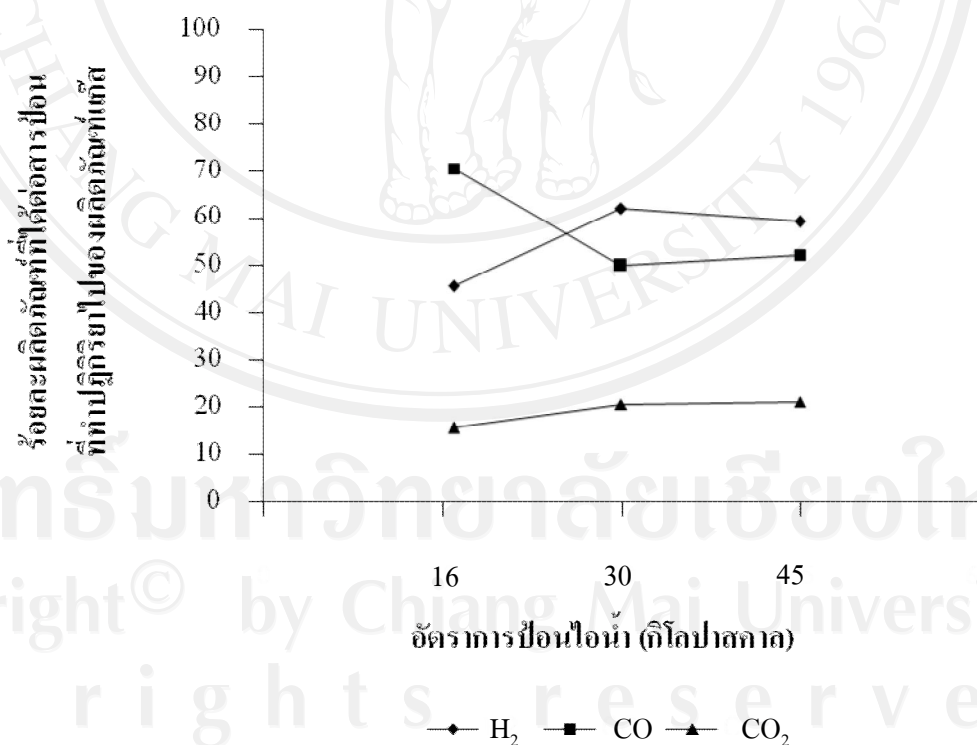
ในส่วนผลรวมของ H_2+CO นั้น พบว่าเมื่อเพิ่มอัตราการป้อนไอน้ำจาก 16 เป็น 30 กิโลปาสคาล มีผลทำให้ผลรวมของ H_2+CO เพิ่มขึ้นจาก 49.46 เป็น 59.75 แต่เมื่อเพิ่มอัตราการป้อนไอน้ำจาก 30 เป็น 45 กิโลปาสคาล ผลรวมของ H_2+CO มีค่าคงที่ อาจเป็นเพราะที่อัตราการป้อนไอน้ำ 45 กิโลปาสคาลนั้นปริมาณของไฮโดรเจนลดลงเล็กน้อย และคาร์บอนมอนอกไซด์เพิ่มขึ้นเล็กน้อย ส่งผลให้ผลรวมของ H_2+CO ไม่เพิ่มขึ้น จึงสามารถสรุปได้ว่าอัตราการป้อนไอน้ำที่เหมาะสมในการผลิตไฮโดรเจนจากยูคาลิปตัสโดยแกสซิฟิเคชันด้วยไอน้ำแบบมีตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลบนถ่านหินลิกไนต์ คือที่อัตราการป้อนไอน้ำ 30 กิโลปาสคาล

3.7.4 ผลของอัตราการป้อนไอน้ำของยูคาลิปตัสต่อตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีต่อร้อยละสารป้อนที่ทำปฏิกิริยาไปของยูคาลิปตัส และร้อยละผลิตภัณฑ์ที่ได้ต่อสารป้อนที่ทำปฏิกิริยาไปของผลิตภัณฑ์แก๊ส

จากผลการทดลองที่อัตราการป้อนไอน้ำ 16, 30 และ 45 กิโลปาสคาล อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส อัตราส่วนยูคาลิปตัสต่อตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลบนถ่านหินลิกไนต์ เท่ากับ 1:1 ที่มีผลต่อร้อยละสารป้อนที่ทำปฏิกิริยาไปของยูคาลิปตัส และร้อยละผลิตภัณฑ์ที่ได้ต่อสารป้อนที่ทำปฏิกิริยาไปของผลิตภัณฑ์แก๊ส แสดงดังรูป 3.18



3.18 (ก) ผลของอัตราการป้อนไอน้ำต่อร้อยละการป้อนที่ทำการปฏิกิริยาไป



3.18 (ข) ร้อยละผลิตภัณฑ์ที่ได้ต่อสารป้อนที่ทำการปฏิกิริยาไปของผลิตภัณฑ์แก๊ส

ผลของอัตราการป้อนไอน้ำที่มีต่อร้อยละสารป้อนที่ทำปฏิกิริยาไปของยูคาลิปตัส และ ร้อยละผลิตภัณฑ์ที่ได้ต่อสารป้อนที่ทำปฏิกิริยาไปของผลิตภัณฑ์แก๊ส แสดงดังรูป 3.18 (ก) และ (ข) พบว่าร้อยละสารป้อนที่ทำปฏิกิริยาไปของยูคาลิปตัส มีค่าค่อนข้างคงที่ ส่วนร้อยละผลิตภัณฑ์ที่ได้ต่อสารป้อนที่ทำปฏิกิริยาไปของผลิตภัณฑ์แก๊ส ที่อัตราการป้อนไอน้ำ 30 กิโลปาสกาล มีปริมาณไฮโดรเจนสูงที่สุดคือ ร้อยละ 61.94 และปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์ต่ำที่สุดคือร้อยละ 50.04 ซึ่งสามารถอธิบายได้จากปฏิกิริยา Steam gasification ต่างๆ ดังที่ได้กล่าวมาแล้ว ในหัวข้อ 3.7.1

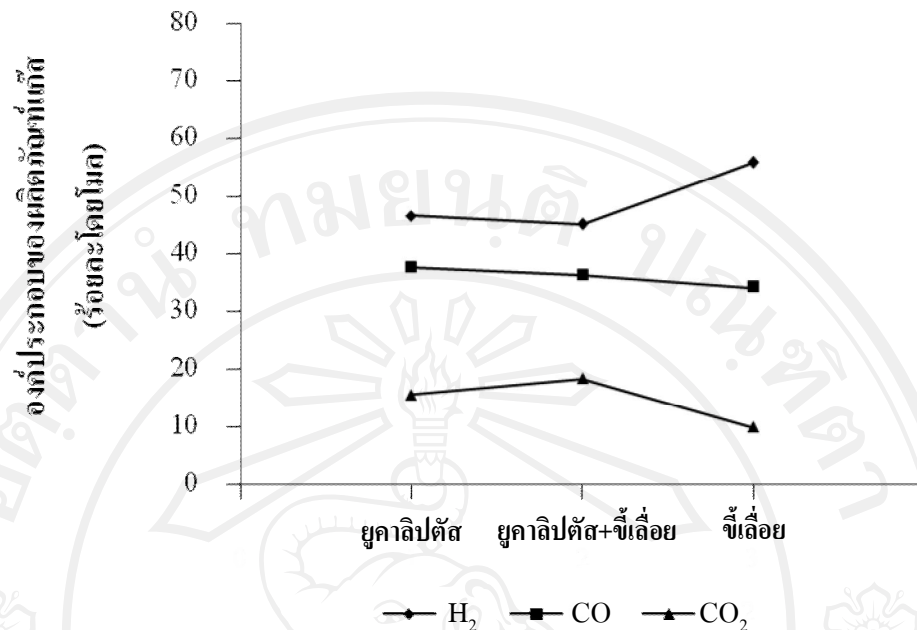
จากผลการทดลอง แสดงให้เห็นว่า อัตราการป้อนไอน้ำที่เหมาะสมในการผลิตไฮโดรเจน ให้ได้ปริมาณมากที่สุด คือ 30 กิโลปาสกาล จึงใช้อัตราการป้อนไอน้ำนี้ ทำการทดลองกับสภาวะอื่นๆ เนื่องจากเป็นอัตราการป้อนไอน้ำที่เหมาะสมในการผลิตไฮโดรเจนโดยแกสซิฟิเคชันของยูคาลิปตัส ด้วยไอน้ำแบบมีตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลบนถ่านหินลิกไนต์

3.8 ผลการศึกษาการเปรียบเทียบชนิดของชีวมวลในการผลิตไฮโดรเจนโดยแกสซิฟิเคชันด้วยไอน้ำแบบมีตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลบนถ่านหินลิกไนต์

การศึกษาผลการเปรียบเทียบของชีวมวลในการผลิตไฮโดรเจนโดยแกสซิฟิเคชันด้วยไอน้ำแบบมีตัวเร่งปฏิกิริยาได้ใช้ชีวมวลในการทดลอง ได้แก่ ยูคาลิปตัส ยูคาลิปตัสผสมขี้เถ้าที่อัตราส่วนโดยมวล 1:1 และขี้เถ้าโดยมีอัตราการป้อนไอน้ำที่ 30 กิโลปาสกาล อุณหภูมิที่ใช้ในการทดลอง 650 องศาเซลเซียส และอัตราส่วนร้อยละ โดยมวลของชีวมวลต่อตัวเร่งปฏิกิริยาเท่ากับ 1:1

3.8.1 ผลการศึกษาการเปรียบเทียบชนิดของชีวมวลที่มีผลต่อองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊ส

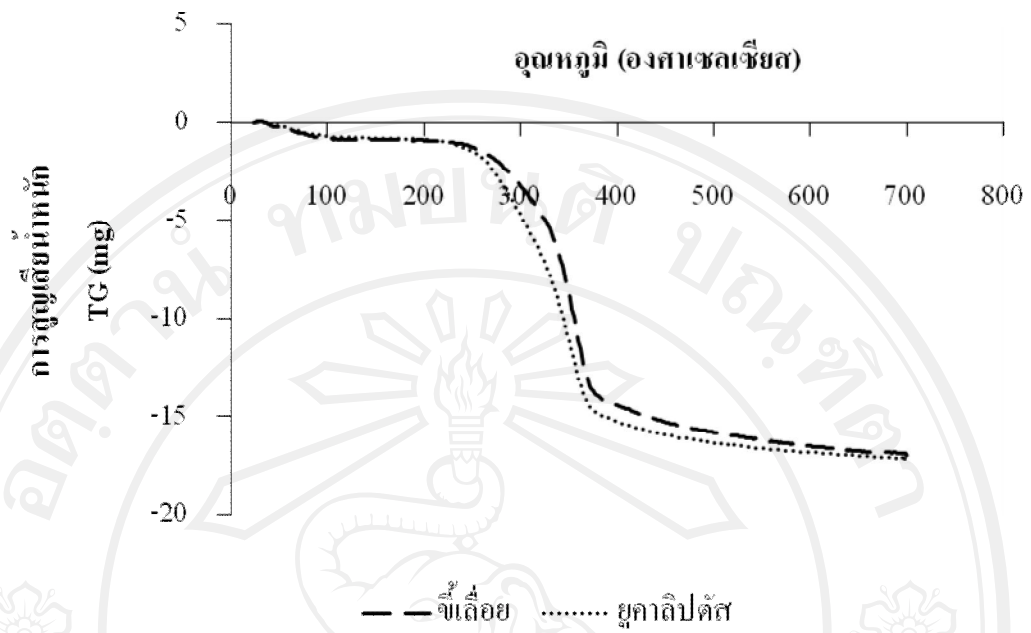
การศึกษาผลการเปรียบเทียบชนิดของชีวมวลในการผลิตไฮโดรเจนโดยแกสซิฟิเคชันด้วยไอน้ำแบบมีตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีผลต่อองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊สทั้ง 3 ชนิดคือ ไฮโดรเจน คาร์บอนมอนอกไซด์ และคาร์บอนไดออกไซด์ แสดงดังรูป 3.19



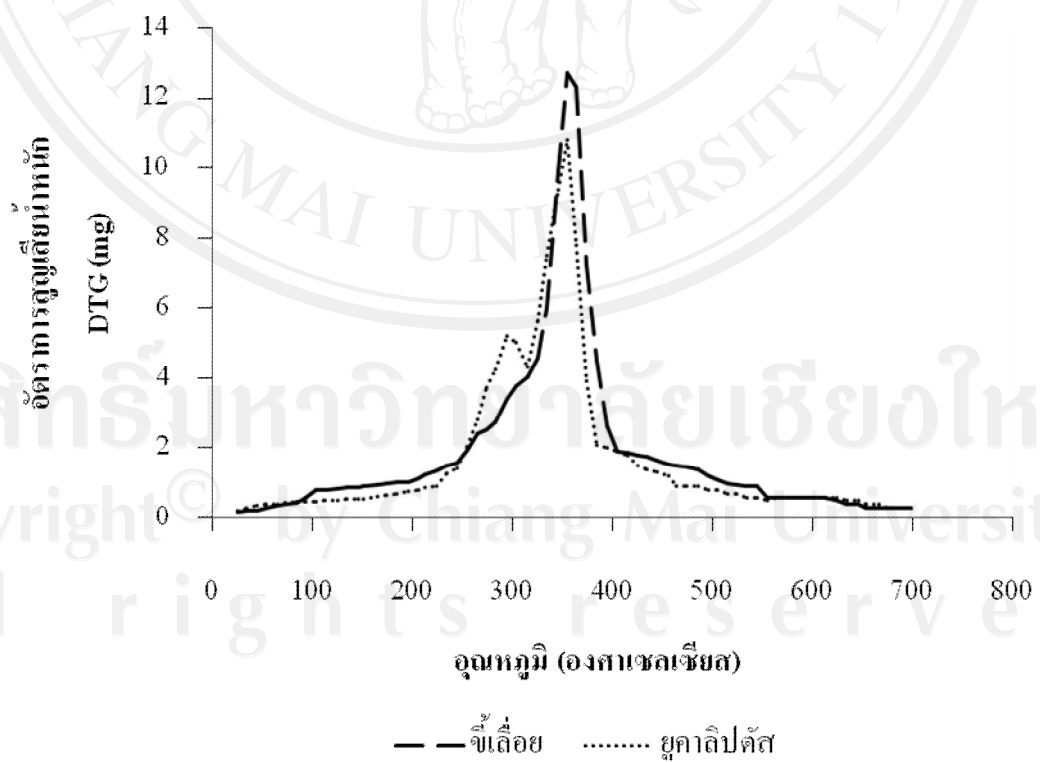
รูป 3.19 ผลการศึกษาการเปรียบเทียบชนิดของชีวมวลที่มีผลต่อองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊ส

จากการศึกษาผลการเปรียบเทียบชนิดของชีวมวล ได้แก่ ยูคาลิปตัส ยูคาลิปตัสผสมจี้เลื่อย และจี้เลื่อย โดยทำการทดลองที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส อัตราการป้อนไอน้ำ 30 กิโลปาสกาล และอัตราส่วนโดยมวลของชีวมวลต่อตัวเร่งปฏิกิริยาเท่ากับ 1:1 จากผลการทดลองแสดงดังรูป 3.19 พบว่าจี้เลื่อยมีปริมาณไฮโดรเจนสูงที่สุด คือร้อยละ 55.84 โดยโมล ส่วนยูคาลิปตัสมีปริมาณร้อยละ 46.68 โดยโมล แต่เมื่อนำยูคาลิปตัสกับจี้เลื่อยมาผสมกัน พบว่า ปริมาณของไฮโดรเจนลดลง ในผลการทดลองของจี้เลื่อยนั้น มีปริมาณร้อยละของผลิตภัณฑ์แก๊สใกล้เคียงกับงานวิจัยของศิริมิตร^[33] ที่ทำการศึกษารื่อง การผลิตไฮโดรเจนจากจี้เลื่อยโดยแกสซิฟิเคชันด้วยไอน้ำแบบมีตัวเร่งปฏิกิริยา พบว่าเมื่อทำการทดลองที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส มีปริมาณของไฮโดรเจนประมาณร้อยละ 58 โดยมวล

ดังจะเห็นได้ว่าที่สถานะในการทดลองเดียวกัน แต่เมื่อเปลี่ยนชนิดของชีวมวล มีผลทำให้ได้ผลิตภัณฑ์แก๊สที่ต่างกัน ทั้งนี้อาจเนื่องมาจาก องค์ประกอบต่างๆที่อยู่ในเนื้อไม้ที่ต่างชนิดกัน รวมไปถึงสารระเหยได้ ที่มีปริมาณไม่เท่ากัน จึงทำให้ผลการทดลองที่ต่างกัน และเมื่อนำเอาชีวมวล 2 ชนิดมาผสมกันกลับทำให้ปริมาณของผลิตภัณฑ์แก๊สลดลง เนื่องจาก อาจเป็นเพราะสารระเหยได้ ที่มีอยู่ในเนื้อไม้แต่ละชนิดมีองค์ประกอบของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่ต่างกัน ดังจะเห็นได้จากผลการวิเคราะห์การสูญเสียน้ำหนัก (Weight loss: TG) และอัตราการสูญเสียน้ำหนัก (Weight loss rate; DTG) ของยูคาลิปตัส และจี้เลื่อย แสดงดังรูป 3.20 และ 3.21



รูป 3.20 การวิเคราะห์การสูญเสียน้ำหนัก



รูป 3.21 อัตราการสูญเสียน้ำหนัก

รูป 3.20 และ 3.21 แสดงผลการวิเคราะห์การสูญเสียน้ำหนัก และอัตราการสูญเสียน้ำหนัก โดยมีอัตราการให้ความร้อน 20 องศาเซลเซียสต่อนาที จากอุณหภูมิห้องจนถึง 700 องศาเซลเซียส ภายใต้สภาวะแก๊สอาร์กอน (Ar) ที่อัตราการไหล 300 มิลลิตรต่อนาที

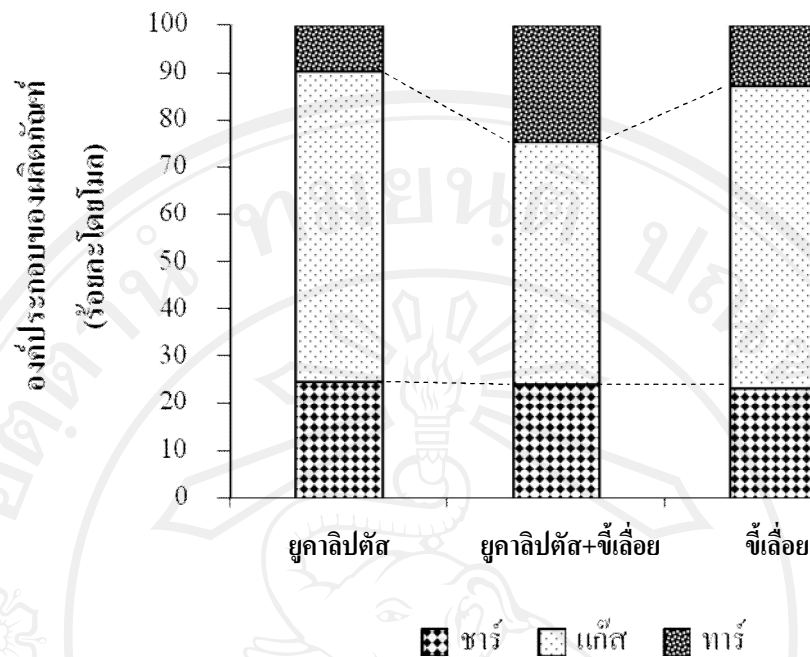
โดยทั่วไปการเกิดฟิสิกการสลายตัวของชีวมวลนั้น จะสัมพันธ์กับองค์ประกอบของชีวมวล ซึ่งชีวมวลทุกชนิดจะประกอบด้วย เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนินเป็นองค์ประกอบสำคัญ โดยภายใต้สภาวะที่อัตราการให้ความร้อนเดียวกัน เฮมิเซลลูโลสจะเกิดการสลายตัวอย่างสมบูรณ์ที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส ส่วนการสลายตัวของเซลลูโลสจะเกิดในช่วง 250 – 500 องศาเซลเซียส และการสลายตัวของลิกนินจะเกิดขึ้นอย่างช้าๆเป็นช่วงกว้าง โดยไม่ปรากฏฟิสิกของการสูญเสีย น้ำหนัก เนื่องจากลิกนินเป็นองค์ประกอบที่เสถียรต่อความร้อนมากที่สุด^[35]

จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่าในส่วนของการสูญเสียน้ำหนัก(รูป 3.20) นั้นยูคาลิปตัส จะมีการสูญเสียน้ำหนักก่อนชี้เลื้อย และอาจเนื่องมาจากไม้ยูคาลิปตัสที่นำมาใช้ในการทดลองนั้น ใช้ส่วนที่เป็นกิ่ง ซึ่งอาจเป็นไปได้ว่าสารระเหยได้ของยูคาลิปตัส เป็นสารประเภทน้ำมันหอมระเหย เมื่อได้รับความร้อน จึงสลายตัวออกมาจัดขวางสารระเหยได้ที่อยู่ในชี้เลื้อย ทำให้เกิดปฏิกิริยาได้น้อยลง

เมื่อพิจารณาผลของอัตราการสูญเสียน้ำหนักของยูคาลิปตัส และชี้เลื้อย (รูป 3.21) พบว่า มีลักษณะของฟิสิกการสลายตัวร่วมกันอยู่ เมื่อนำเอายูคาลิปตัสกับชี้เลื้อยมาผสมกันแล้ว ได้ปริมาณของผลิตภัณฑ์แก๊สต่างๆ ลดลงนั้นอาจเป็นเพราะ การที่สารระเหยได้ของยูคาลิปตัสที่ได้รับความร้อนแล้วสลายตัวออกมาก่อน อาจจะไปขวางกั้นสารระเหยได้ของชี้เลื้อย ซึ่งออกมาช้ากว่า จึงทำให้สารระเหยได้ของชีวมวลทั้ง 2 ชนิด ไม่สามารถเข้าไปทำปฏิกิริยากับตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลบนถ่านหินลิกไนต์ได้อย่างเต็มที่ จึงส่งผลให้ปริมาณของผลิตภัณฑ์แก๊สที่ได้ลดลง

3.8.2 ผลการศึกษาการเปรียบเทียบชนิดของชีวมวลที่มีผลต่อร้อยละการกระจายตัวของผลิตภัณฑ์ทั้งหมด

การศึกษาระยะการกระจายตัวของผลิตภัณฑ์ทั้งหมดของยูคาลิปตัส ยูคาลิปตัสผสมชี้เลื้อย และชี้เลื้อย ที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส อัตราการป้อนไอน้ำ 30 กิโลปาสคาล และอัตราส่วนของชีวมวลต่อตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลบนถ่านหินลิกไนต์เท่ากับ 1:1 แสดงดังรูป 3.22

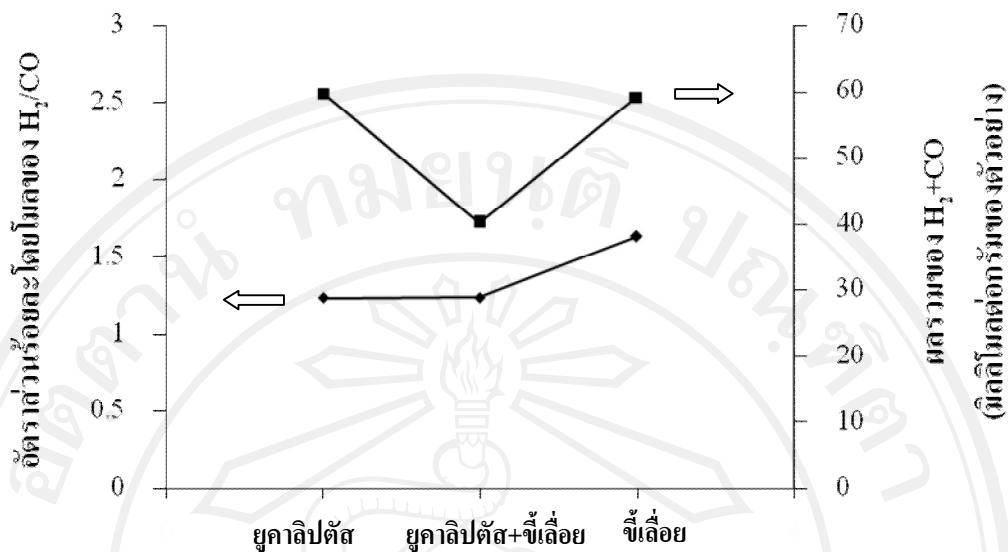


รูป 3.22 ผลการศึกษาการเปรียบเทียบชนิดของชีวมวลที่มีผลต่อร้อยละการกระจายตัวของผลิตภัณฑ์ทั้งหมด

จากผลการศึกษาการกระจายตัวของผลิตภัณฑ์ทั้งหมดของยูคาลิปตัส ยูคาลิปตัสผสมจี้เลื่อย และจี้เลื่อย แสดงดังรูป 3.22 พบว่า ปริมาณชาร์ของยูคาลิปตัส ยูคาลิปตัสผสมจี้เลื่อย และจี้เลื่อยมีค่าใกล้เคียงกัน ส่วนปริมาณผลิตภัณฑ์แก๊ส และทาร์ของยูคาลิปตัส กับจี้เลื่อยมีค่าแตกต่างกันเล็กน้อย คือร้อยละ 65.77 กับ 63.89 โดยโมล และร้อยละ 9.59 กับ 12.92 โดยโมล ตามลำดับ ทั้งนี้อาจเกิดจาก อิทธิพลของสารระเหยได้ของยูคาลิปตัสดังที่กล่าวไว้ในหัวข้อ 3.8.1 แต่เมื่อนำยูคาลิปตัสมาผสมกับจี้เลื่อยที่อัตราส่วน โดยมวลเท่ากับ 1:1 กลับพบว่ามีปริมาณแก๊สน้อยกว่าของยูคาลิปตัส และจี้เลื่อย ซึ่งอาจเนื่องมาจากเหตุผลต่างๆที่ได้อธิบายไว้แล้วในหัวข้อ 3.8.1

3.8.3 ผลการศึกษาการเปรียบเทียบชนิดของชีวมวลที่มีผลต่ออัตราส่วนร้อยละโดยโมลของ H_2/CO และผลรวมของ H_2+CO

จากการศึกษาการเปรียบเทียบชนิดของชีวมวลที่มีผลต่ออัตราส่วนร้อยละโดยโมลของ H_2/CO และผลรวมของ H_2+CO จากยูคาลิปตัส ยูคาลิปตัสผสมจี้เลื่อย และจี้เลื่อย ที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส อัตราการป้อนไอน้ำ 30 กิโลปาสกาล และอัตราส่วนของชีวมวลต่อตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลบนถ่านหินลิกไนต์เท่ากับ 1:1 แสดงดังรูป 3.23



รูป 3.23 ผลการศึกษาการเปรียบเทียบชนิดของชีวมวลที่มีผลต่ออัตราส่วนร้อยละ โดยโมลของ H_2/CO และผลรวมของ H_2+CO

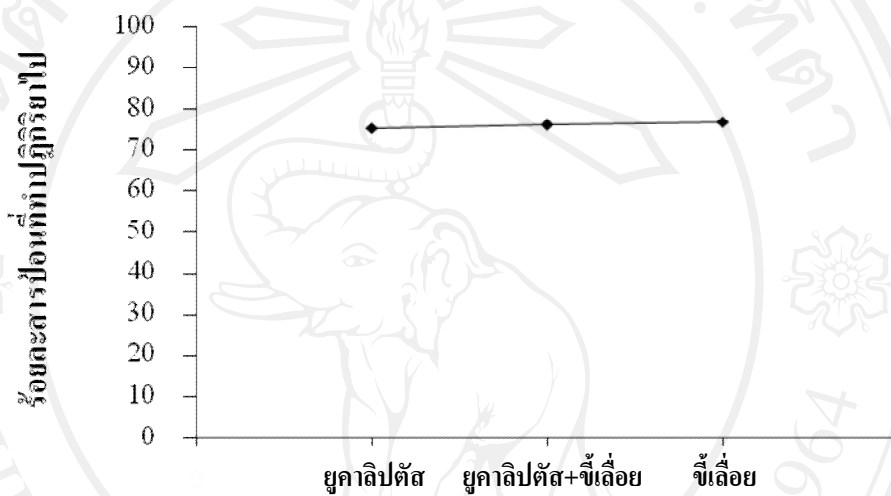
จากผลการศึกษา การเปรียบเทียบชนิดของชีวมวลที่มีผลต่ออัตราส่วนร้อยละโดยโมลของ H_2/CO และผลรวมของ H_2+CO พบว่า อัตราส่วนร้อยละโดยโมลของยูคาลิปตัส กับยูคาลิปตัสผสม ขี้เลื่อย มีค่าเท่ากัน คือ 1.24 แต่เมื่อพิจารณาจากผลรวมของ H_2+CO จะเห็นได้ว่า ในส่วนของยูคาลิปตัสผสมขี้เลื่อยนั้นมีค่าเพียง 40.25 มิลลิโมลต่อกรัมของตัวอย่าง ทั้งนี้เนื่องจากผลิตภัณฑ์แก๊สไฮโดรเจน และคาร์บอนมอนอกไซด์ของยูคาลิปตัสผสมขี้เลื่อยนั้นมีค่าค่อนข้างน้อย จึงไม่สามารถพิจารณาที่อัตราส่วนร้อยละโดยโมลของ H_2/CO ได้เพียงอย่างเดียว

ในส่วนของขี้เลื่อยนั้น พบว่า ที่อัตราส่วนร้อยละโดยโมลของ H_2/CO นั้นมีค่าสูงถึง 1.63 ทั้งนี้เนื่องจาก ปริมาณไฮโดรเจนของขี้เลื่อยมีค่าค่อนข้างสูง แต่ปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์มีต่ำ จึงส่งผลให้เมื่อคิดเป็นอัตราส่วนร้อยละโดยโมล H_2/CO แล้วของขี้เลื่อยมีค่าสูงกว่ายูคาลิปตัส ส่วนผลรวมของ H_2+CO นั้น ทั้งของยูคาลิปตัส และขี้เลื่อยมีค่าใกล้เคียงกัน

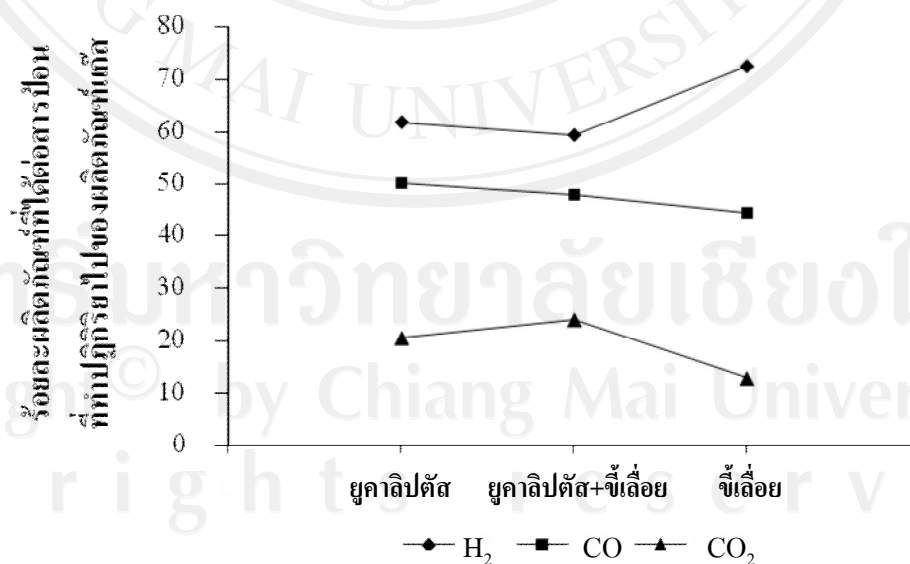
จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่า ขี้เลื่อยนั้นค่อนข้างจะมีประสิทธิภาพในการผลิตแก๊สไฮโดรเจนโดยแก๊สไฟเคชันด้วยไอน้ำแบบมีตัวเร่งปฏิกิริยา มากกว่ายูคาลิปตัส แต่เมื่อพิจารณาในเชิงเศรษฐศาสตร์แล้วขี้เลื่อยที่นำมาใช้ในการทดลองเป็นขี้เลื่อยจากไม้สัก ซึ่งไม้สักค่อนข้างจะมีราคาสูง และหาได้ยากกว่าไม้ยูคาลิปตัส และเมื่อนำมาขยายขนาดในการผลิตเป็นแก๊สเชื้อเพลิงอาจจะต้องมีการพิจารณาถึงจุดคุ้มทุน และสถานะอื่นๆที่เหมาะสมอีกครั้ง

3.8.4 ผลการศึกษาการเปรียบเทียบชนิดของชีวมวลต่อร้อยละสารป้อนที่ทำปฏิกิริยาไป และร้อยละผลิตภัณฑ์ที่ได้ต่อสารป้อนที่ทำปฏิกิริยาไปของผลิตภัณฑ์แก๊ส

จากผลการศึกษาเปรียบเทียบชนิดของชีวมวลที่มีผลต่อร้อยละสารป้อนที่ทำปฏิกิริยาไปของยูคาลิปตัส และร้อยละผลิตภัณฑ์ที่ได้ต่อสารป้อนที่ทำปฏิกิริยาไปของผลิตภัณฑ์แก๊สที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส อัตราการป้อนไอน้ำ 30 กิโลปาสกาล อัตราส่วนโดยมวลของชีวมวลต่อตัวเร่งปฏิกิริยาเท่ากับ 1:1 แสดงดังรูป 3.24 (ก) และ (ข)



(ก) ผลการเปรียบเทียบชนิดของชีวมวลต่อร้อยละสารป้อนที่ทำปฏิกิริยาไป



(ข) ร้อยละผลิตภัณฑ์ที่ได้ต่อสารป้อนที่ทำปฏิกิริยาไปของผลิตภัณฑ์แก๊ส

รูป 3.24 ผลของชีวมวลต่อร้อยละผลิตภัณฑ์ที่ได้ต่อสารป้อนที่ทำปฏิกิริยาไปของผลิตภัณฑ์แก๊ส

การเปรียบเทียบชนิดของชีวมวลที่มีผลต่อร้อยละสารป้อนที่ทำปฏิกิริยาไปของชีวมวลชนิดต่างๆ และร้อยละผลิตภัณฑ์ที่ได้ต่อสารป้อนที่ทำปฏิกิริยาไปของผลิตภัณฑ์แก๊ส แสดงดังรูป 3.24 (ก) และ (ข) พบว่าร้อยละสารป้อนที่ทำปฏิกิริยาไปของยูคาลิปตัส ยูคาลิปตัสผสมจีเลื้อย และจีเลื้อย มีค่าใกล้เคียงกัน ซึ่งในขั้นตอนการไล่สารระเหย ได้มีการให้อุณหภูมิคงที่ ที่ 700 องศาเซลเซียส ในทุกการทดลอง ดังจะเห็นได้จากร้อยละสารป้อนที่ทำปฏิกิริยาไปนั้น มีค่าใกล้เคียงกัน

ส่วนร้อยละผลิตภัณฑ์ที่ได้ต่อสารป้อนที่ทำปฏิกิริยาไปของผลิตภัณฑ์แก๊สของจีเลื้อยนั้น มีปริมาณไฮโดรเจนสูงที่สุดคือ ร้อยละ 72.69 และปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์ต่ำที่สุดคือร้อยละ 44.47 ส่วนยูคาลิปตัสผสมจีเลื้อยนั้นมีปริมาณไฮโดรเจนค่อนข้างต่ำ คือร้อยละ 59.40 และปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์ร้อยละ 47.81 ซึ่งสามารถอธิบายได้จากเหตุผลต่างๆ ดังที่ได้กล่าวมาแล้ว ในหัวข้อ 3.8.1

3.9 ผลการศึกษาการนำตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลบนถ่านหินลิกไนต์มาใช้ซ้ำเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา

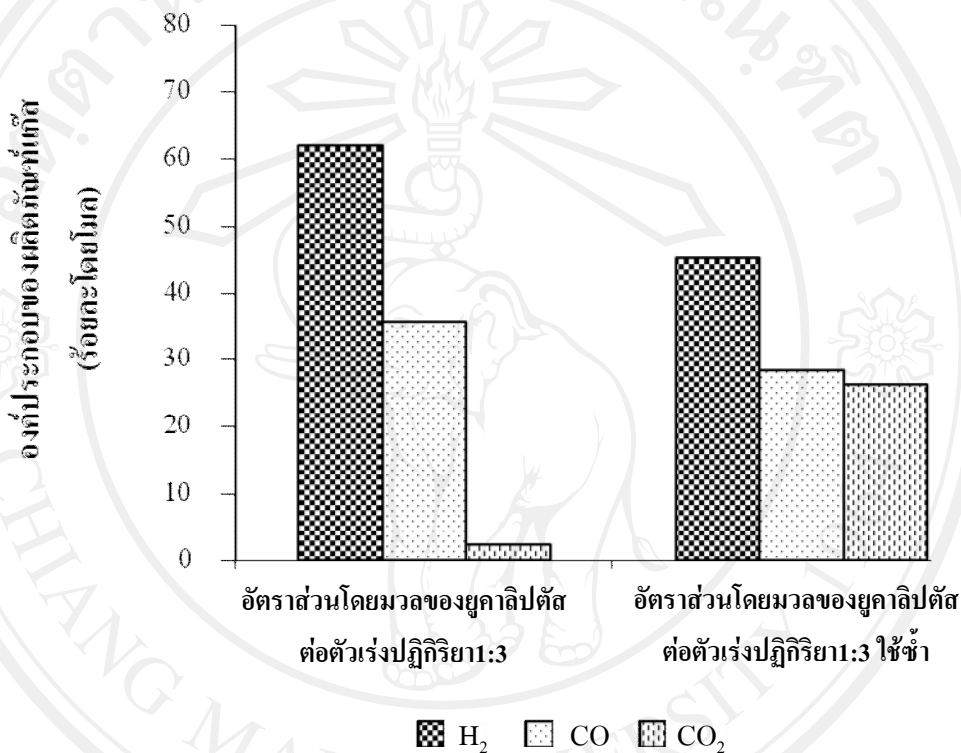
การศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลบนถ่านหินลิกไนต์ที่ผ่านการใช้งานมาแล้ว 1 ครั้ง โดยใช้อัตราส่วนโดยมวลของยูคาลิปตัสต่อตัวเร่งปฏิกิริยาที่ 1:3 มาทดสอบเพื่อศึกษาผลิตภัณฑ์แต่ละชนิด โดยเปรียบเทียบผลการศึกษากับอัตราส่วนโดยมวลของยูคาลิปตัสต่อตัวเร่งปฏิกิริยาที่ 1:3 ทำการทดลองที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส อัตราการป้อนไอน้ำที่ 30 กิโลปาสกาล และยูคาลิปตัสประมาณ 1 กรัม

3.9.1 ผลการศึกษาการนำตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลบนถ่านหินลิกไนต์มาใช้ซ้ำที่มีผลต่อองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊ส

ผลการศึกษาเปรียบเทียบอัตราส่วนโดยมวลของยูคาลิปตัสต่อตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลบนถ่านหินลิกไนต์ที่อัตราส่วน 1:3 และ 1:3 ใช้ซ้ำ ที่มีผลต่อองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊สแต่ละชนิด คือ ไฮโดรเจน คาร์บอนมอนอกไซด์ และคาร์บอนไดออกไซด์ แสดงดังรูป 3.25

จากผลการทดลอง พบว่าเมื่อนำตัวเร่งปฏิกิริยามาใช้ซ้ำนั้น ทำให้ปริมาณของไฮโดรเจนและคาร์บอนมอนอกไซด์ลดลง จากร้อยละ 62.12 เป็น 45.30 และ จากร้อยละ 35.61 เป็น 28.35 โดยโมล ตามลำดับ สามารถอธิบายได้ว่า การที่นำตัวเร่งปฏิกิริยาที่ผ่านการใช้แล้วมาใช้ซ้ำนั้น อาจเกิดการเสื่อมสภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา เนื่องจากการเกาะติดของคาร์บอนบนพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งอาจจะไปขัดขวางการเกิดปฏิกิริยาต่างๆ ของแก๊สฟีดเช้น จึงทำให้ปริมาณของผลิตภัณฑ์แก๊สไฮโดรเจน และคาร์บอนมอนอกไซด์ ลดลง ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ นุปผา^[18] ที่ได้

ทำการศึกษาเรื่อง การผลิตไฮโดรเจนเข้มข้นจากแก๊สฟิเคชันของชีวมวลโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา $\text{Ni/K}_2\text{CO}_3/\text{Y-Al}_2\text{O}_3$ โดยนำตัวเร่งปฏิกิริยาที่ผ่านการใช้งานแล้วกลับมาใช้งานใหม่ พบว่ามีผลทำให้ผลิตภัณฑ์แก๊สรวมลดลง ซึ่งเมื่อนำตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้งานแล้วไปบำบัด (Regenerate) แล้วนำกลับมาทดสอบใหม่ พบว่าปริมาณแก๊สลดลง ทาร์เพิ่มขึ้น ซึ่งอาจจะเกิดจากตัวเร่งปฏิกิริยาเสื่อมสภาพแล้วไม่สามารถบำบัดให้กลับมาใช้งานใหม่ได้เหมือนเดิม



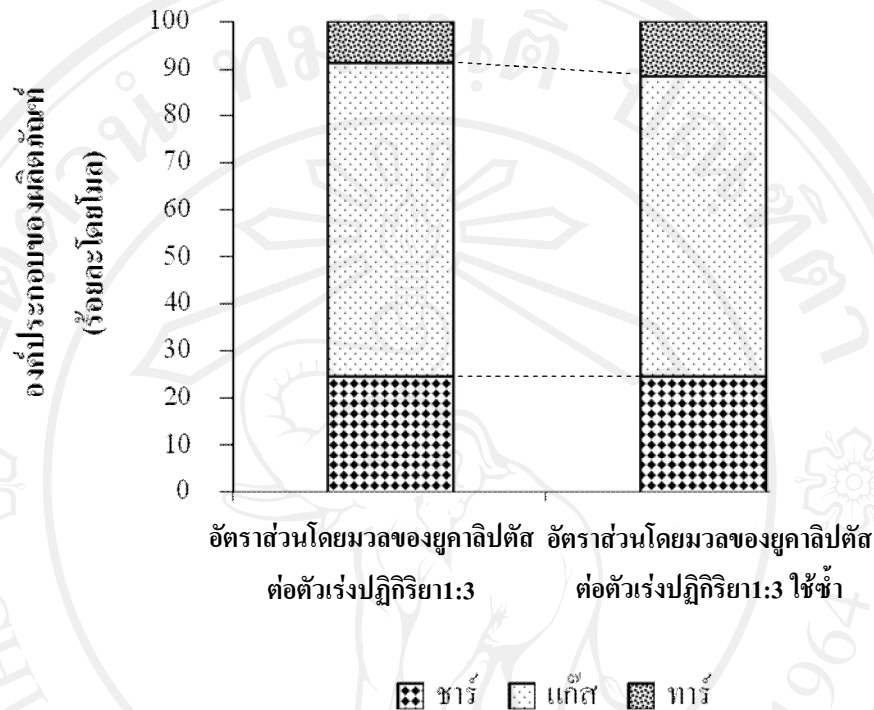
รูป 3.25 ผลการศึกษาการนำตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลบนถ่านหินลิกไนต์มาใช้ซ้ำที่มีผลต่อองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊ส

3.9.2 ผลการศึกษาการนำตัวเร่งปฏิกิริยามาใช้ซ้ำที่มีผลต่อร้อยละการกระจายตัวของผลิตภัณฑ์

ผลการศึกษาเปรียบเทียบ อัตราส่วนโดยมวลของยูคาลิปตัสต่อตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลบนถ่านหินลิกไนต์ที่ 1:3 กับ 1:3 ใช้ซ้ำ ที่มีผลต่อร้อยละการกระจายตัวของผลิตภัณฑ์ แสดงดังรูป 3.26

เมื่อพิจารณาผลของอัตราส่วนโดยมวลของยูคาลิปตัสต่อตัวเร่งปฏิกิริยาที่ 1:3 และ 1:3 ใช้ซ้ำ พบว่า ปริมาณคาร์บอนของยูคาลิปตัสมีค่าค่อนข้างคงที่ ในส่วนของผลิตภัณฑ์แก๊ส และทาร์ พบว่าการนำตัวเร่งปฏิกิริยามาใช้ซ้ำมีผลทำให้ ผลรวมของผลิตภัณฑ์แก๊สลดลงเล็กน้อย และทาร์เพิ่มขึ้น ซึ่ง

แก๊สส่วนใหญ่นั้นเป็นคาร์บอนไดออกไซด์ เนื่องจากอาจเกิดจากการที่มีคาร์บอนมาเกาะที่พื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา ทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาต่างๆของแก๊สฟิชั่น เกิดได้ไม่ด้นัก

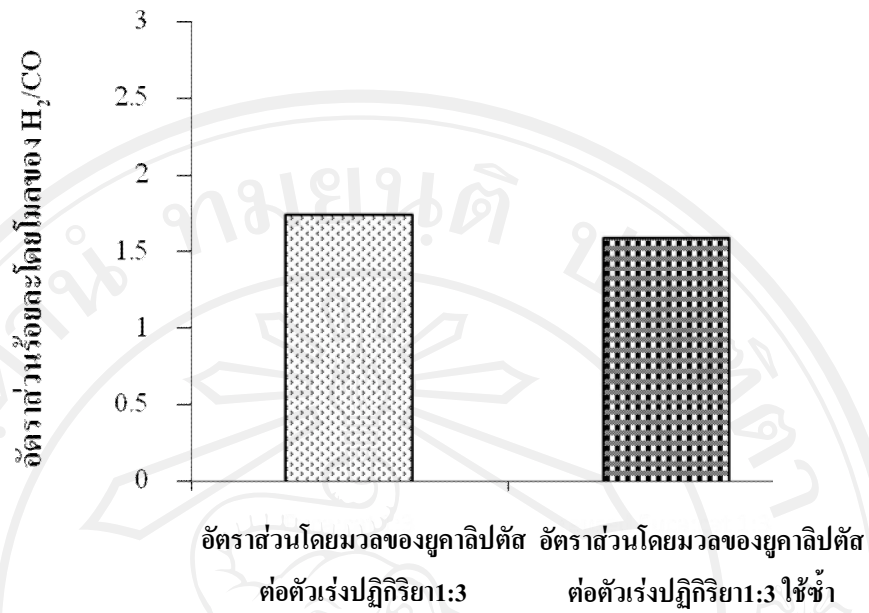


รูป 3.26 ผลการศึกษาการนำตัวเร่งปฏิกิริยามาใช้น้ำที่มีผลต่อร้อยละการกระจายตัวของผลิตภัณฑ์

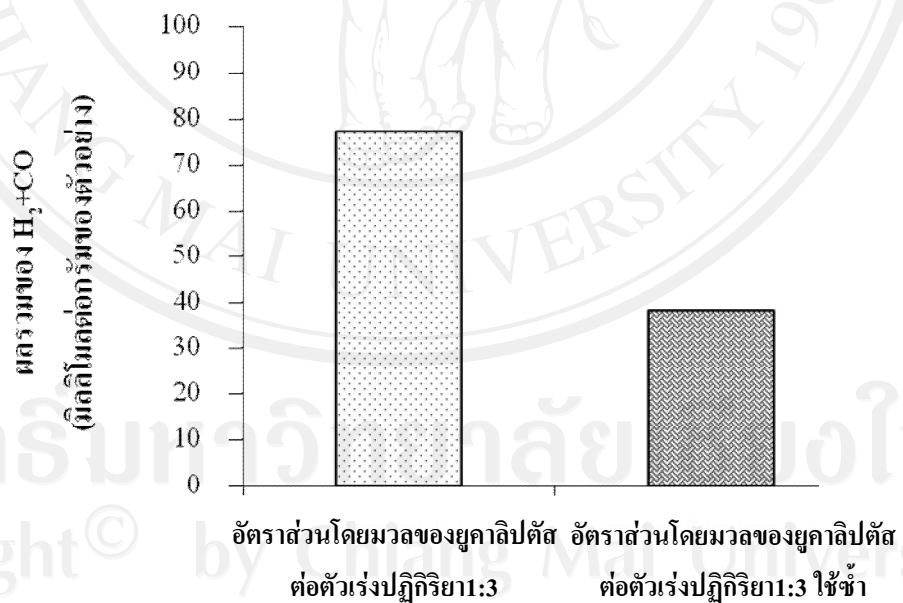
3.9.3 ผลการศึกษาการนำตัวเร่งปฏิกิริยามาใช้น้ำ ที่มีผลต่ออัตราส่วนร้อยละโดยมวลของ H_2/CO และผลรวมของ H_2+CO

จากผลการศึกษาเปรียบเทียบอัตราส่วน โดยมวลของยูคาลิปตัสต่อตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลบนถ่านหินลิกไนต์ที่อัตราส่วน 1:3 และ 1:3 ใช้น้ำ ที่มีผลต่ออัตราส่วนร้อยละ โดยมวลของ H_2/CO และผลรวมของ H_2+CO แสดงดังรูป 3.27 (ก) และ (ข)

จากผลการศึกษาการนำตัวเร่งปฏิกิริยามาใช้น้ำที่มีผลต่ออัตราส่วนร้อยละ โดยโมลของ H_2/CO พบว่า ที่อัตราส่วนโดยมวลของยูคาลิปตัสต่อตัวเร่งปฏิกิริยาที่ 1:3 ใช้น้ำ มีค่าลดลง จาก 1.74 เป็น 1.60 และผลรวมของ H_2+CO ลดลงจาก 77.23 เป็น 38.19 มิลลิโมลต่อกรัมของตัวอย่าง การที่ผลิตภัณฑ์เกิดจากการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาใช้น้ำ อาจมีสาเหตุจากการที่คาร์บอนจากทาร์ และสารระเหยได้ไปเกาะบนพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา จึงส่งผลให้อัตราส่วนร้อยละ โดยมวลของ H_2/CO และผลรวมของ H_2+CO ลดลงตามไปด้วย ดังที่ได้อธิบายไว้แล้วในหัวข้อ 3.9.1



(ก) ผลการศึกษาการนำตัวเร่งปฏิกิริยามาใช้ซ้ำ ที่มีผลต่ออัตราส่วนร้อยละ โดยโมลของ H_2/CO



(ข) ผลการศึกษาการนำตัวเร่งปฏิกิริยามาใช้ซ้ำ ที่มีผลต่อผลรวมของ H_2+CO

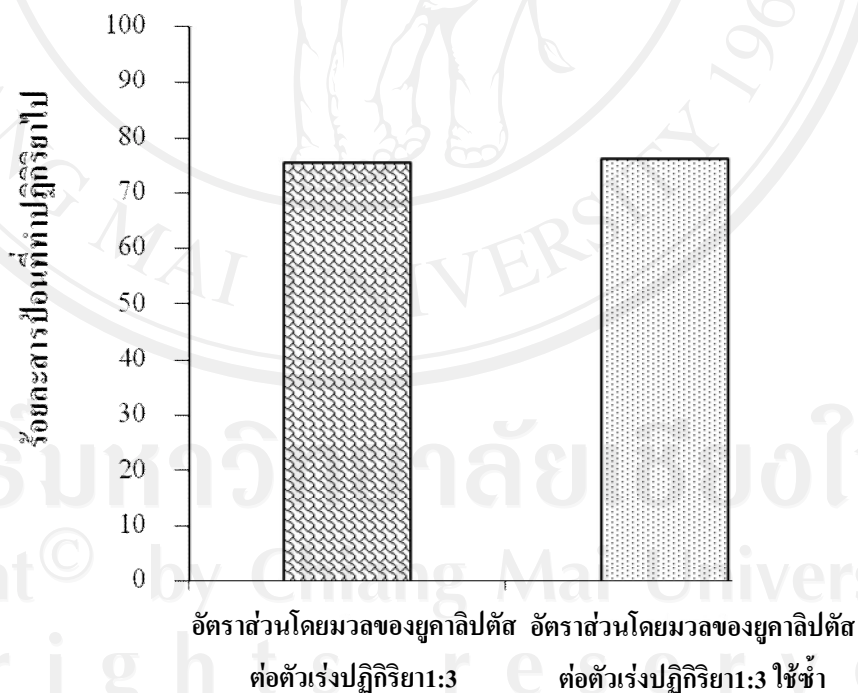
รูป 3.27 ผลการศึกษาการนำตัวเร่งปฏิกิริยามาใช้ซ้ำ

3.9.4 ผลการศึกษาการนำตัวเร่งปฏิกิริยามาใช้ซ้ำที่มีผลต่อร้อยละสารป้อนที่ทำปฏิกิริยาไป และร้อยละผลิตภัณฑ์ที่ได้ต่อสารป้อนที่ทำปฏิกิริยาไปของผลิตภัณฑ์แก๊ส

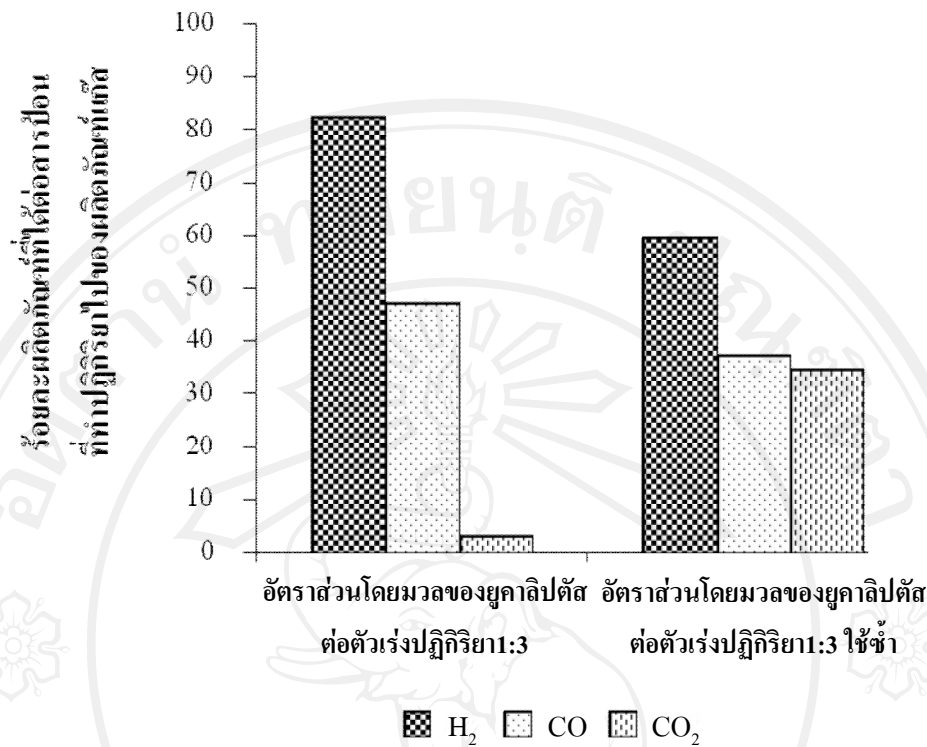
การศึกษาเปรียบเทียบอัตราส่วน โดยมวลของยูคาลิปตัสต่อตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลบนถ่านหินลิกไนต์ที่อัตราส่วน 1:3 และ 1:3 ใช้ซ้ำที่มีผลต่อร้อยละสารป้อนที่ทำปฏิกิริยาไปของยูคาลิปตัส และร้อยละผลิตภัณฑ์ที่ได้ต่อสารป้อนที่ทำปฏิกิริยาไปของผลิตภัณฑ์แก๊ส แสดงดังรูป 3.28 (ก) และ (ข)

จากผลการนำตัวเร่งปฏิกิริยามาใช้ซ้ำที่มีผลต่อร้อยละสารป้อนที่ทำปฏิกิริยาไปของยูคาลิปตัสและร้อยละผลิตภัณฑ์ที่ได้ต่อสารป้อนที่ทำปฏิกิริยาไปของผลิตภัณฑ์แก๊ส แสดงดังรูป 3.28 (ก) และ (ข) พบว่าร้อยละสารป้อนที่ทำปฏิกิริยาไปของยูคาลิปตัส มีค่าใกล้เคียงกัน

ส่วนร้อยละผลิตภัณฑ์ที่ได้ต่อสารป้อนที่ทำปฏิกิริยาไปของผลิตภัณฑ์แก๊สของอัตราส่วน โดยมวลของยูคาลิปตัสต่อตัวเร่งปฏิกิริยาที่ 1:3 ใช้ซ้ำ นั้นมีปริมาณไฮโดรเจนค่อนข้างต่ำ คือร้อยละ 59.54 และปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์ร้อยละ 37.26 ซึ่งสามารถอธิบายได้จากเหตุผลต่างๆ ดังที่ได้กล่าวมาแล้ว ในหัวข้อ 3.9.1 - 3.9.2



(ก) ผลการศึกษาการนำตัวเร่งปฏิกิริยามาใช้ซ้ำที่มีผลต่อร้อยละสารป้อนที่ทำปฏิกิริยาไป



(ข) ร้อยละผลิตภัณฑ์ที่ได้ต่อสารป้อนที่ทำปฏิกิริยาไปของผลิตภัณฑ์แก๊ส

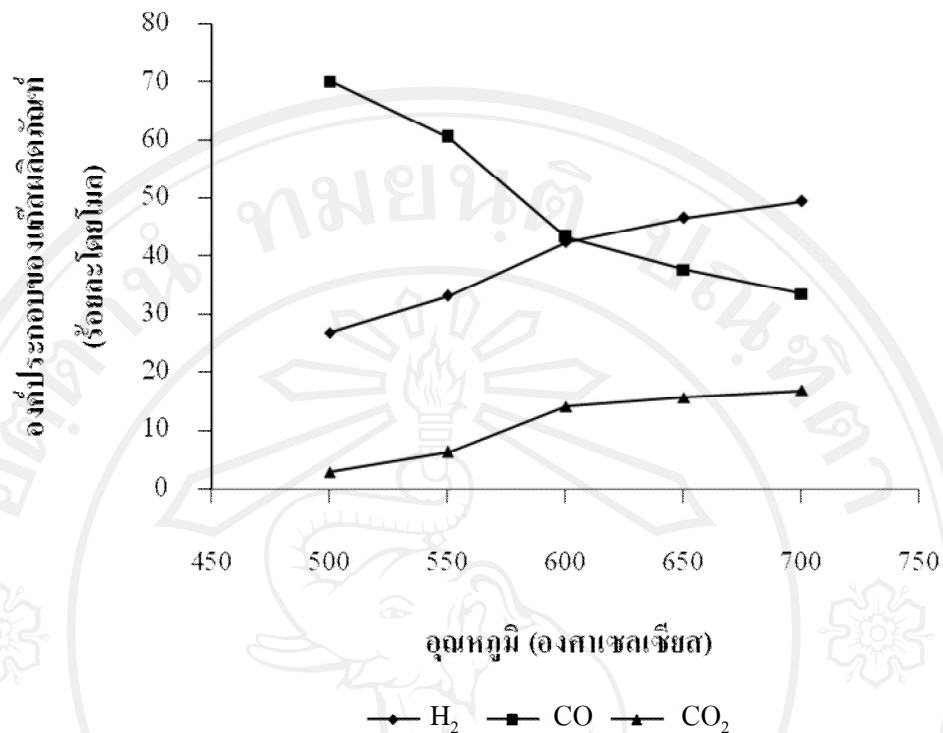
รูป 3.28 ผลการศึกษาการนำตัวเร่งปฏิกิริยามาใช้ซ้ำต่อร้อยละสารป้อนที่ทำปฏิกิริยาไป

3.10 ผลการศึกษาแนวโน้มของผลิตภัณฑ์ที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส โดยการแกลิฟิเคชันของ ยูคาลิปตัสด้วยไอน้ำ แบบมีตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลบนถ่านหินลิกไนต์

การศึกษาแนวโน้มของผลิตภัณฑ์แต่ละชนิดที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส เพื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลองในช่วงอุณหภูมิ 500-650 องศาเซลเซียส โดยใช้อัตราการป้อนไอน้ำ 30 กิโล-ปาสกาล ยูคาลิปตัสประมาณ 1 กรัม และอัตราส่วนโดยมวลของยูคาลิปตัสต่อตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลบนถ่านหินลิกไนต์เท่ากับ 1:1

3.10.1 ผลการศึกษาแนวโน้มองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊สที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส

เมื่อพิจารณาผลการศึกษาแนวโน้มองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊สทั้ง 3 ชนิด คือ ไฮโดรเจน คาร์บอนมอนอกไซด์ และคาร์บอนไดออกไซด์ ผลการทดลองแสดงดังรูป 3.29



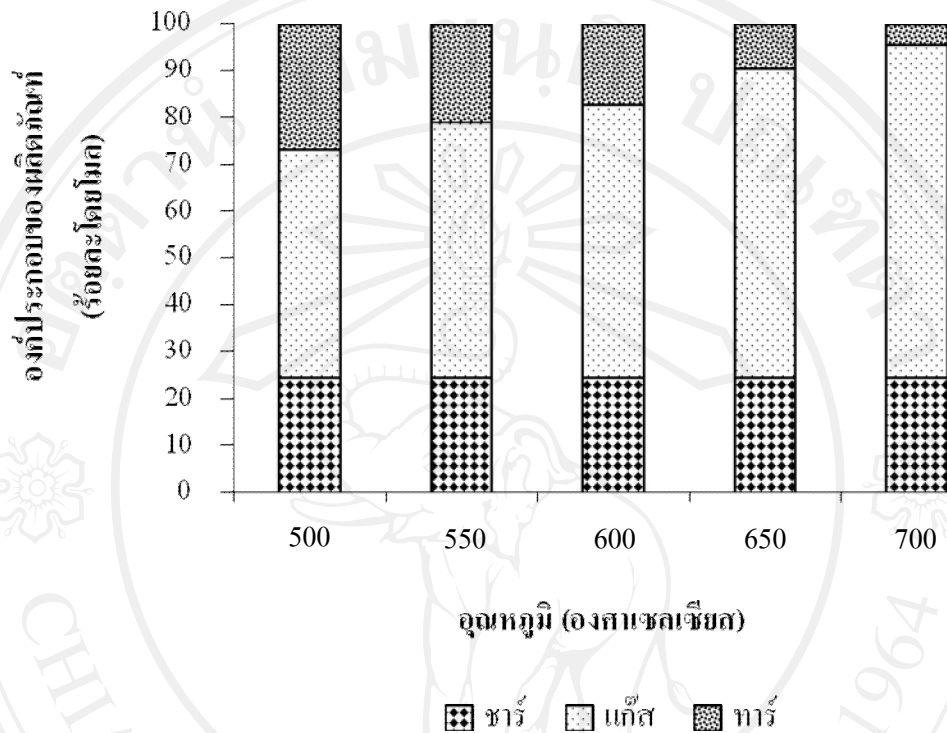
รูป 3.29 ผลการศึกษาแนวโน้มองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊สที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส

จากผลการศึกษาแนวโน้มของผลิตภัณฑ์แก๊สแต่ละชนิด ที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส พบว่า เมื่อเพิ่มอุณหภูมิจาก 650 เป็น 700 องศาเซลเซียส ปริมาณไฮโดรเจน และคาร์บอนไดออกไซด์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 46.68 เป็น 49.55 และ ร้อยละ 15.61 เป็น 16.89 โดยโมลตามลำดับ ส่วนคาร์บอนมอนอกไซด์ลดลงจากร้อยละ 37.71 เป็น 33.56 โดยโมล อาจเนื่องมาจากอิทธิพลของปฏิกิริยาต่างๆ ของ Steam gasification โดยเฉพาะปฏิกิริยา Water-gas shift ที่เป็นปฏิกิริยาคูดความร้อน ซึ่งปฏิกิริยาจะเกิดไปข้างหน้าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น สอดคล้องกับงานวิจัยของ Gao และคณะ^[41] ซึ่งทำการศึกษาเรื่อง Hydrogen-rich gas production from biomass steam gasification in an updraft fixed-bed gasifier combined with a porous ceramic reformer พบว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิ จะทำให้เกิดปฏิกิริยาคูดความร้อนได้ดีขึ้น และทำให้ปริมาณไฮโดรเจนเพิ่มสูงขึ้น

3.10.2 ผลการศึกษาแนวโน้มของอุณหภูมิที่มีผลต่อการกระจายตัวของผลิตภัณฑ์ทั้งหมด

การศึกษาแนวโน้มของผลิตภัณฑ์ทั้งหมดที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส เพื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลองในช่วงอุณหภูมิ 500-650 องศาเซลเซียส โดยใช้อัตราการป้อนไอน้ำ 30 กิโล-

พลาสติก ยูคาลิปตัสประมาณ 1 กรัม และอัตราส่วนโดยมวลของยูคาลิปตัสต่อตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลบนถ่านหินลิกไนต์เท่ากับ 1:1 แสดงดังรูป 3.30

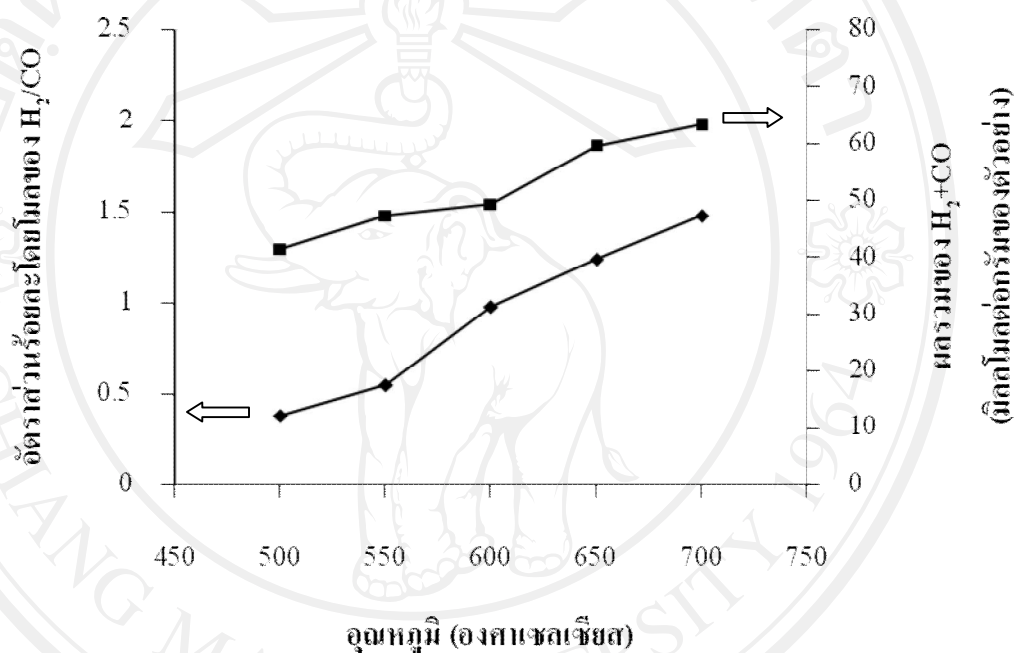


รูป 3.30 ผลการศึกษาแนวโน้มของอุณหภูมิที่มีผลต่อการกระจายตัวของผลิตภัณฑ์ทั้งหมด

จากผลการศึกษาการกระจายตัวของผลิตภัณฑ์ทั้งหมด ที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส เปรียบเทียบกับช่วงอุณหภูมิ 500-650 องศาเซลเซียสที่ได้ทำการทดลองในหัวข้อ 3.5 พบว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิเป็น 700 องศาเซลเซียส ปริมาณชาร์ค่อนข้างคงที่เช่นเดียวกับช่วงอุณหภูมิอื่น ดังที่ได้อธิบายไว้ก่อนหน้านี้แล้วในหัวข้อ 3.5.2 ส่วนปริมาณแก๊สเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 71.01 โดยโมล และปริมาณทาร์ลดลงเป็นร้อยละ 4.35 โดยโมล ซึ่งการที่เพิ่มอุณหภูมิขึ้นเป็น 700 องศาเซลเซียส แล้วนั้น อาจทำให้เกิดปฏิกิริยา Thermal cracking ได้เพิ่มขึ้น เนื่องจากเป็นปฏิกิริยาดูดความร้อน เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นปฏิกิริยาจะเกิดไปข้างหน้า จึงทำให้แนวโน้มของปริมาณแก๊สเพิ่มขึ้น และปริมาณทาร์ลดลง ตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น อีกทั้งการที่อุณหภูมิสูงขึ้นนั้น ทำให้ทาร์ และสารไฮโดรคาร์บอนสามารถแตกตัวได้มากขึ้น จึงส่งผลให้ผลิตภัณฑ์แก๊สเพิ่มขึ้นตามไปด้วย

3.10.3 ผลการศึกษาแนวโน้มของอุณหภูมิที่ 700 องศาเซลเซียส ที่มีผลต่ออัตราส่วนร้อยละโดยโมลของ H_2/CO และผลรวมของ H_2+CO

ผลการศึกษาแนวโน้มของอุณหภูมิที่ 700 องศาเซลเซียสที่มีผลต่ออัตราส่วนร้อยละโดยโมลของ H_2/CO และผลรวมของ H_2+CO โดยใช้อัตราการป้อนไอน้ำ 30 กิโลปาสคาล และอัตราส่วนโดยมวลของยูคาลิปตัสต่อตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลบนถ่านหินลิกไนต์เท่ากับ 1:1 แสดงดังรูป 3.31



รูป 3.31 ผลการศึกษาแนวโน้มของอุณหภูมิที่มีผลต่ออัตราส่วนร้อยละโดยมวลของ H_2/CO และผลรวมของ H_2+CO

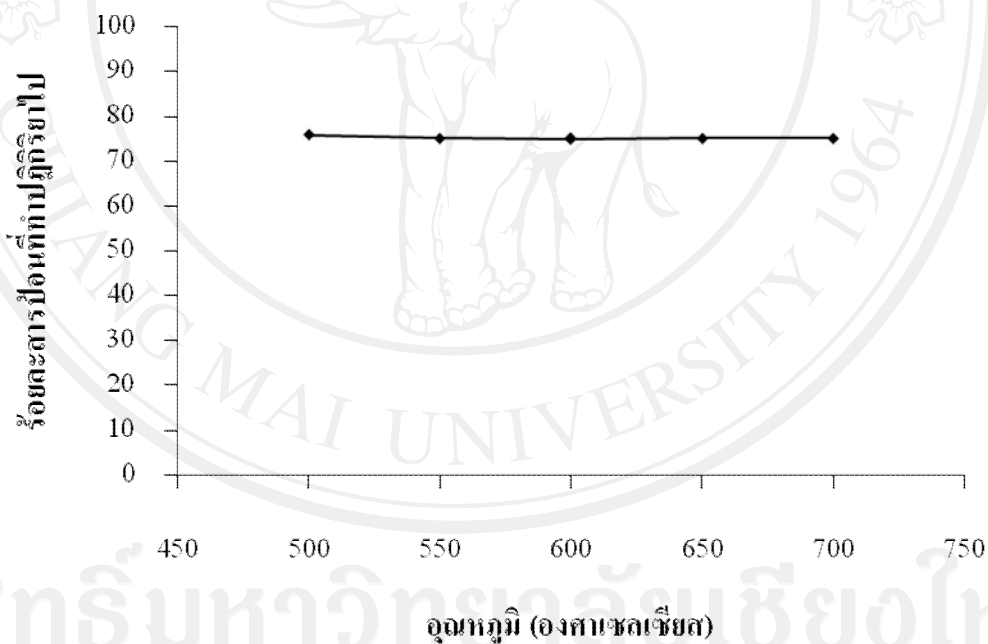
จากผลการศึกษาแนวโน้มของอุณหภูมิที่ 700 องศาเซลเซียสที่มีผลต่ออัตราส่วนร้อยละโดยโมลของ H_2/CO และผลรวมของ H_2+CO แสดงดังรูป 3.31 พบว่า แนวโน้มอัตราส่วนร้อยละโดยโมลของ H_2/CO เพิ่มขึ้นเป็น 1.48 ที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส เนื่องจากปฏิกิริยา Water-gas shift ที่ส่งผลให้ได้ปริมาณผลิตภัณฑ์ของไฮโดรเจนสูงขึ้น และการบอมมอนอกไซด์ลดลง

ส่วนผลรวมของ H_2+CO พบว่า มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกัน โดยที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส ผลรวมของ H_2+CO เท่ากับ 63.47 มิลลิโมลต่อกรัมของตัวอย่าง เนื่องจากปฏิกิริยาต่างๆ ของแก๊สที่ได้ออกมาได้กล่าวไว้แล้วในหัวข้อ 3.5.1-3.5.3 ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Luo และคณะ^[48] ที่ได้ทำการศึกษาเรื่อง Hydrogen-rich gas from catalytic steam gasification of biomass in

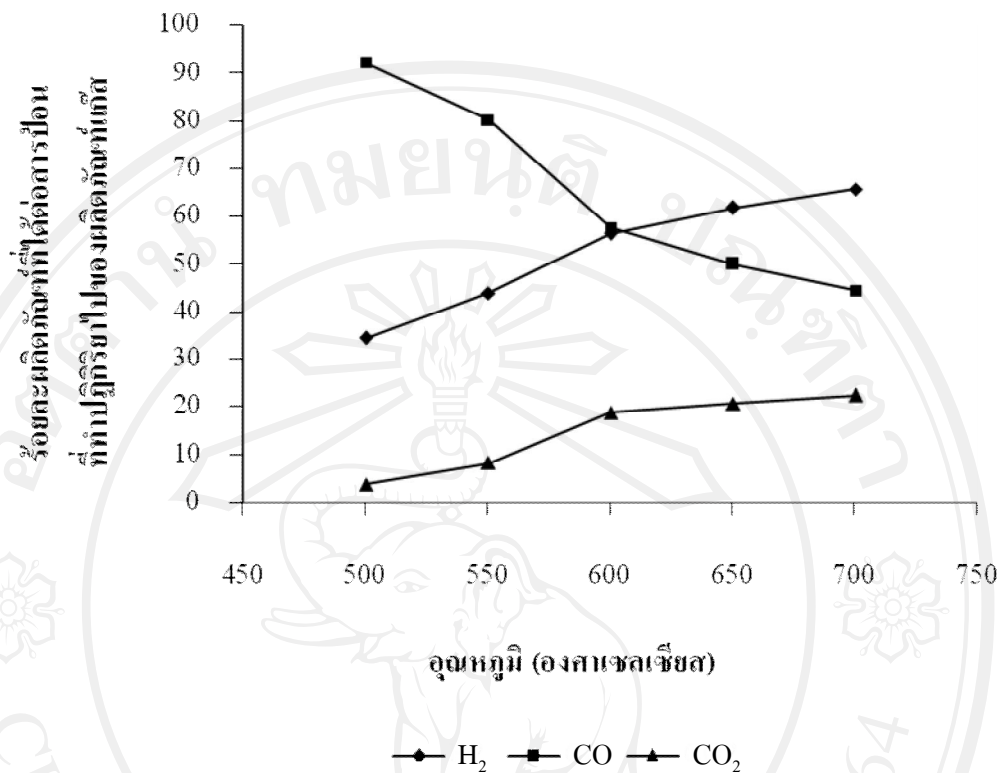
a fixed bed reactor: Influence of temperature and steam on gasification performance พบว่า เมื่อทำการเพิ่มอุณหภูมิจาก 600 ถึง 900 องศาเซลเซียส อัตราส่วนของ H_2/CO มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจาก 0.68 เป็น 2.63 เนื่องจากปฏิกิริยา Water-gas shift เป็นหลัก

3.10.4 ผลการศึกษาแนวโน้มของอุณหภูมิที่ 700 องศาเซลเซียสที่มีผลต่อร้อยละสารป้อนที่ทำปฏิกิริยาไปของยูคาลิปตัส และร้อยละผลิตภัณฑ์ที่ได้ต่อสารป้อนที่ทำปฏิกิริยาไปของผลิตภัณฑ์แก๊ส

จากผลการทดลองที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส อัตราส่วนยูคาลิปตัสต่อตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลบนถ่านหินลิกไนต์ เท่ากับ 1:1 ที่มีผลต่อ ร้อยละสารป้อนที่ทำปฏิกิริยาไปของยูคาลิปตัส และร้อยละผลิตภัณฑ์ที่ได้ต่อสารป้อนที่ทำปฏิกิริยาไปของผลิตภัณฑ์แก๊ส แสดงดังรูป 3.32



รูป 3.32 (ก) ผลการเปรียบเทียบอุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียสที่มีผลต่อร้อยละสารป้อนที่ทำปฏิกิริยาไปของยูคาลิปตัส



รูป 3.32 (ข) ร้อยละผลิตภัณฑ์ที่ได้ต่อสารป้อนที่ทำปฏิกิริยาไปของผลิตภัณฑ์แก๊ส

การเปรียบเทียบอุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียสที่มีผลต่อร้อยละสารป้อนที่ทำปฏิกิริยาไปของยูคาลิปตัส และร้อยละผลิตภัณฑ์ที่ได้ต่อสารป้อนที่ทำปฏิกิริยาไปของผลิตภัณฑ์แก๊ส แสดงดังรูป 3.32 (ก) และ (ข) พบว่าร้อยละสารป้อนที่ทำปฏิกิริยาไปของยูคาลิปตัส มีค่าค่อนข้างคงที่

ส่วนร้อยละผลิตภัณฑ์ที่ได้ต่อสารป้อนที่ทำปฏิกิริยาไปของผลิตภัณฑ์แก๊ส ที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียสนั้นมีปริมาณไฮโดรเจนสูงที่สุดคือ ร้อยละ 65.75 และปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์ต่ำที่สุดคือร้อยละ 44.53 ซึ่งสามารถอธิบายได้จากปฏิกิริยาแกสฟิเคชันต่างๆ ดังที่ได้กล่าวมาแล้ว ในหัวข้อ 3.5.1

3.11 เปรียบเทียบผลการทดลองกับงานวิจัยอื่นๆ

การเปรียบเทียบผลของงานวิจัยนี้กับงานวิจัยอื่น แสดงดังตาราง 3.5

ตาราง 3.5 เปรียบเทียบผลการทดลองกับงานวิจัยอื่นๆ

ผู้วิจัย	ชนิดของเครื่อง ปฏิกรณ์ (Reactor type)	ตัวอย่างที่ใช้ในการ ทดลอง (Sample)	ชนิดของ ตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst)	อัตราการป้อน ไอน้ำ	อุณหภูมิที่ใช้ใน การทดลอง (°C)	อัตราส่วนของ H ₂ /CO
1. Li ^[14]	Two-stage fixed-bed	Japanese cypress (1 g)	Ni-loaded Loy yang brown coal	30 kPa (2.2 g/h/g)	650 °C	2.2
2. บุญผา ^[18]	Fixed-bed	Rice husk (0.12 g)	Ni/K ₂ CO ₃ /γ-Al ₂ O ₃ (3.4 g)	0.15 g/h/g	800 °C	1.08
3. สุพัตรา ^[19]	Fixed-bed	Eucalyptus (15 g)	Dolomite (0.15 g)	0.15 g/h/g	550 °C	0.96
4. ศิริวิรินทร์ ^[33]	Two-stage fixed-bed	Teak sawdust (1 g)	Nickel-loaded Lignite (3 g) (Biomass:catalyst=1:3)	16 kPa (1.09 g/h/g)	600 °C	2.33

ตาราง 3.5 เปรียบเทียบผลการทดลองกับงานวิจัยอื่นๆ (ต่อ)

ผู้วิจัย	ชนิดของเครื่อง ปฏิกรณ์ (Reactor type)	ตัวอย่างที่ใช้ในการ ทดลอง (Sample)	ชนิดของ ตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst)	อัตราการป้อน ไอน้ำ	อุณหภูมิที่ใช้ใน การทดลอง (°C)	อัตราส่วนของ H ₂ /CO
5. อนวรรตน์ ^[34]	Fixed-bed	Eucalyptus (15 g)	Ni/Dolomite (0.15 g)	0.15 g/h/g	700 °C	0.58
6. Zhang ^[38]	Two-stage fixed-bed	Pig manure compost (1 g)	Ni/Al ₂ O ₃ (3 g) (Biomass:catalyst=1:3)	30 kPa (2.2 g/h/g)	600 °C	2.10
7. Chaudhari ^[41]	Fixed bed	Bagasse char	-	10 g/h/g	750 °C	6.8
8. งานวิจัยนี้	Two-stage fixed-bed	Eucalyptus (1 g)	Nickel-loaded Lignite (5 g) (Biomass:catalyst=1:5)	30 kPa (2.2 g/h/g)	650 °C	1.96

จากผลการทดลองทั้งหมด สามารถสรุปได้ว่า ที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส อัตราส่วนโดยมวลของยูคาลิปตัสต่อตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลบนถ่านหินลิกไนต์ที่ 1:5 และอัตราการป้อนไอน้ำที่ 30 กิโลปาสคาลนั้น เป็นอัตราส่วนที่สามารถให้ผลิตภัณฑ์ที่เป็นแก๊สไฮโดรเจนได้ปริมาณมากที่สุดในการผลิตแก๊สไฮโดรเจนจากยูคาลิปตัสโดยแกสซิฟิเคชันด้วยไอน้ำแบบมีตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลบนถ่านหินลิกไนต์ สำหรับงานวิจัยนี้ ดังจะเห็นได้จากอัตราส่วนร้อยละโดยโมลของ H_2/CO ที่สูงที่สุดคือ 1.96

เมื่อทำการเปรียบเทียบผลการทดลองกับงานวิจัยอื่น พบว่ามีสภาวะการทดลองใกล้เคียงกับงานวิจัยของศิริมรินทร์ ที่ได้ทำการผลิตแก๊สไฮโดรเจนจากขี้เลื่อยโดยแกสซิฟิเคชันด้วยไอน้ำแบบมีตัวเร่งปฏิกิริยา โดยมีอัตราส่วนร้อยละโดยโมลของ H_2/CO เท่ากับ 2.33 ซึ่งมีค่าสูงกว่างานวิจัยนี้เล็กน้อย ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากตัวอย่างของชีวมวลที่ใช้ในการทดลองนั้น มีองค์ประกอบที่ต่างกัน และจากผลการเปรียบเทียบการแกสซิฟิเคชันของชีวมวลทั้ง 2 ชนิด คือ ยูคาลิปตัส และขี้เลื่อยในงานวิจัยนี้ ที่สภาวะการทดลองเดียวกัน ขี้เลื่อยจะสามารถผลิตแก๊สไฮโดรเจนได้ในปริมาณที่สูงกว่ายูคาลิปตัส จึงส่งผลให้อัตราส่วนร้อยละโดยโมลของ H_2/CO ของขี้เลื่อยนั้นสูงกว่าของยูคาลิปตัส